# STORIA DEL TEMPO

Dal Big Bang
ai Buchi Neri

**Stephen Hawking**

*Questo libro è dedicato a Jane*

VISIT…

# INDICE

Indice.....2
Ringraziamenti.....3
Prologo.....5
Introduzione.....7
Capitolo 1: La nostra Immagine dell'Universo.....9
Capitolo 2: Spazio e Tempo.....20
Capitolo 3: L'Universo in Espansione.....38
Capitolo 4: Il Principio di Incertezza.....52
Capitolo 5: Le Particelle Elementari e le Forze della Natura.....59
Capitolo 6: I Buchi Neri.....73
Capitolo 7: I Buchi Neri non sono tanto Neri.....88
Capitolo 8: L'Origine ed il Destino dell'Universo.....101
Capitolo 9: La Freccia del Tempo.....121
Capitolo 10: Worm's Hole e Viaggi nel Tempo..... 129
Capitolo 11: L'Unificazione della Fisica.....138
Capitolo12: Conclusione.....150
Albert Einstein.....154
Galileo Galilei.....156
Isaac Newton…….....158

## RINGRAZIAMENTI

Decisi di scrivere un'opera di divulgazione sullo spazio ed il tempo dopo avere impartito in Harvard le conferenze Loeb di 1982. Esisteva già una considerabile bibliografia circa l'universo primitivo e dei buchi neri, nella quale figuravano da libri molto buoni, come quello di Steven Weinberg, *I tre primi minuti dell'universo,* fino ad altri molto brutti, che non nominerò. Tuttavia, sentiva che nessuno di essi si dirigeva realmente alle questioni che mi avevano portato ad investigare in cosmologia e nella teoria quantica: da dove viene l'universo? Come e perché incominciò? Avrà un fine, e, in caso affermativo, come sarà? Queste sono questioni di interesse per tutti gli uomini. Ma la scienza moderna è diventata tanto tecnica che solo un piccolo numero di specialisti sono capaci di dominare la matematica utilizzata nella sua descrizione. Nonostante ciò, le idee basilari circa l'origine e del destino dell'universo possono essere enunciate senza matematica, di tale maniera che le persone senza un'educazione scientifica possano capirli. Questo è quello che ho cercato di fare in questo libro. Il lettore deve giudicare se l'ho ottenuto.

Qualcuno mi disse che ogni equazione che includesse nel libro ridurrebbe le vendite alla metà. Quindi, decisi di non mettere in assoluto nessun. Alla fine, tuttavia, sé che inclusi un'equazione, la famosa equazione di Einstein, E=mc2. Spero che questo non spaventi alla metà dei miei potenziali lettori.

A parte essere stato sufficientemente sfortunato per contrarre l'ALS, o malattia dei neuroni motori, ho avuto fortuna in quasi tutti gli altri aspetti. L'aiuto ed appoggio che ho ricevuto di mia moglie, Jane, e dei miei figli, Robert, Lucy e Timmy, mi hanno fatto possibile portare una vita abbastanza normale ed avere successo nella mia corsa. Andai di nuovo fortunato scegliendo la fisica teorica, perché tutto sta nella mente. Così, la mia malattia non ha costituito un serio svantaggio. I miei colleghi scientifici sono stati, senza eccezione, un gran aiuto per me.

Nella prima fase "classica" della mia corsa, i miei compagni e collaboratori principali furono Roger Penrose, Robert Geroch, Brandon Cárter e George Ellis. Sono loro grato per l'aiuto che mi prestarono e per il lavoro che realizziamo insieme. Questa fase fu raccolta nel libro *The Large Scale Structure of Spacetime* che Ellis ed io scriviamo in 1973. Sconsiglierebbe i lettori di questo libro consultare quell'opera per una maggiore informazione: è altamente tecnica ed abbastanza arida. Aspetto avere imparato da allora a scrivere in una maniera più facile da capire.

Nella seconda fase "quantica" del mio lavoro, da 1974, i miei principali collaboratori sono stati Gary Gibbons, Don Page e Jim Hartle. Devo loro molto che mi hanno aiutato moltissimo, tanto nel senso fisico come nel senso teorico della parola. L'avere dovuto

mantenere il ritmo dei miei studenti è stato un gran stimolo, e ha evitato, così l'aspetto, che mi rimanesse ancorato nella routine.

Per la realizzazione di questo libro ho ricevuto gran aiuto di Brian Whitt, uno dei miei alunni. Contrassi una polmonite in 1985, dopo avere scritto la prima brutta copia. Mi fu dovuta effettuare un'operazione di tracheotomia che mi privò della capacità di parlare, e res quasi impossibile che chiunque potesse comunicarmi. Pensai che sarei stato incapace di finirlo. Tuttavia, Brian mi aiutò non solo a rivederlo, ma mi insegnò anche ad utilizzare un programma di comunicazioni chiamato Living Center donato da Walt Woltosz, di Words Plus Inc., in Sunnyvale, California. Con esso posso scrivere libri ed articoli, ed inoltre parlare con la gente per mezzo di un sintetizzatore donato dalla Speech Plus, anche essa di Sunnyvale. Il sintetizzatore ed un piccolo personal computer furono installati nella mia sedia a rotelle da David Masón. Questo sistema ha capovolto la situazione: in realtà, posso comunicarmi meglio ora che prima di perdere la voce.

Ho ricevuto parecchi suggerimenti su come migliorare il libro, forniti dalla gran quantità di persone che avevano letto le versioni preliminari. In particolare, da Peter Guzzardi, il mio editore in Bantam Books chi mi inviò nemerose pagine di commenti e domande circa punti che egli credeva che non erano stati spiegati adeguatamente. Devo ammettere che mi irritai abbastanza quando ricevei la sua estesa lista di cose che dovevano essere cambiate, ma egli aveva ragione. Sono sicuro che questo libro ha migliorato molto grazie a che mi fece lavorare senza riposo.

Sono molto grato ai miei aiutanti, Grissino Williams, David Thomas e Raymond Lafiamme; alle mie segretarie Judy Fella, Ann Ralph, Cheryl Billington e Sue Masey; ed alla mia squadra di infermiere. Niente di questo sarebbe stato possibile senza l'aiuto economico, per la mia ricerca e le spese mediche, ricevuta di Gonville and Caius College, lo Science and Engineeering Research Council, e le fondazioni Leverhulme, MeArthur, Nufield e Ralph Smith. La mia sincera gratitudine a tutti essi.

Stephen Hawking 20 Ottobre del 1987.

## Prologo

Io non scrissi un prologo all'edizione originale di Storia del Tempo. Quello fu fatto per Carl Sagan. Invece, scrissi un pezzo breve intitolato "Riconoscimenti" nei quali mi consigliarono che ringraziasse per tutti. Alcune delle fondazioni che mi avevano dato appoggio non furono molto grate di essere stato menzionati, tuttavia, anche perché portò ad un gran aumento in applicazioni.

Io penso che nessuno, i miei editori, il mio agente, o io, sperò che il libro facesse qualcosa come quello che fece. Stette nella lista di best-seller del London Sunday Times per 237 settimane, più che qualunque altro libro, apparentemente, non si raccontano il Bibbia e Shakespeare. Si è tradursi in qualcosa come quaranta lingue e ha venduto approssimativamente una copia per ogni 750 uomini, donne, e bambini nel mondo. Come Nathan Myhrvold di Microsoft, un anteriore il mio editore, commentò: Io ho venduto più libri su fisica che Madona su sesso.

Il successo di Storia del Tempo indica che c'è interesse esteso nelle domande grandi come: Da dove venimmo noi? E perché è l'universo della maniera che è?

Ho approfittato dell'opportunità per aggiornare il libro ed includere nuovi risultati teorici ed observacionales ottenuto da quando il libro fu pubblicato per la prima volta, nel Giorno degli Innocenti di aprile, 1988. Ho incluso un nuovo capitolo di "worm's hole" e viaggi nel tempo. La Teoria Generale di Einstein di Relatività sembra offrire la possibilità che noi potremmo creare e potremmo mantenere "worm's hole", piccoli tubi che collegano regioni differenti di spazio-tempo. In quello caso, potremmo essere capaci di usarli per viaggi rapidi attraverso la galassia o ritornare nel tempo. Ovviamente, non abbiamo visto nessuno del futuro, (o abbiamo? ma io discuto una possibile spiegazione per questo.

Descrivo anche il progresso che si è fatto recentemente trovando "dualità" o corrispondenze tra teorie apparentemente differenti di fisiche. Queste corrispondenze sono un'indicazione forte che c'è una teoria unificatrice completa della fisica, ma anche esse suggeriscono che non possa essere possibile esprimere questa teoria in una sola formulazione fondamentale. Invece, noi possiamo dovere usare riflessioni differenti la teoria soggiacente in situazioni differenti. Potremmo essere incapaci di rappresentare la superficie della terra in una sola mappa e

[1] questo documento fu digitalizzato della prima versione in spagnolo, eccetto il prologo ed il capitolo 10 che fu ottenuto della seconda versione, pubblicata dovuto al successo ottenuto. Pertanto, i cambiamenti ed aggiornamenti che Hawking segnala in questo prologo, non sono specchiati in questo documento. Nota del '*scanner '.*

dovendo usare mappe differenti in regioni differenti. Questa sarebbe una rivoluzione nella nostra vista dell'unificazione delle leggi di scienza ma non cambierebbe il punto

più importante: che l'universo è governato per un gioco di leggi razionali che noi possiamo scoprire e possiamo capire.

Nel lato astronomico lontano lo sviluppo più importante è stato la misura di fluttuazioni nella radiazione di fondo di microonde per COBE, Cosmic Background Explorer satellite, satellite di Esplorazione del Fondo Cosmico, ed altre collaborazioni. Queste fluttuazioni sono la 'impressione digitale' della creazione, le minute irregolarità iniziali nel d'altra parte liscio ed uniforme universo precoce che dopo crebbe nelle galassie, stelle, e tutte le strutture che vediamo intorno a nostro. La sua forma è in accordo con le predizioni dell'ipotesi che l'universo non ha nessun limite o bordi nella direzione di tempo immaginaria; ma estese osservazioni saranno necessarie per accertare questa tesi rispetto ad altre possibili spiegazioni per le fluttuazioni. Tuttavia, tra alcuni anni dovremmo sapere se possiamo credere che viviamo in un universo che è ompletamente autonomo e senza principio o termine.

Stephen Hawking

## INTRODUZIONE

Ci muoviamo nel nostro ambiente giornaliero senza capire quasi niente circa il mondo. Dedichiamo poco tempo a pensare al meccanismo che genera la luce solare che fa possibile la vita, nella gravità che ci lega alla Terra e che di un'altra forma ci lancerebbe allo spazio, o negli atomi di cui siamo costituiti e dalla cui stabilità dipendiamo in maniera fondamentale. Eccetto i bambini che non sanno quanto basta come per non domandare le questioni importanti, pochi di noi dedichiamo tempo a domandarci perché la natura è della forma che è, da dove sorse il cosmo, o se stette sempre qui, se il tempo correrà in senso contrario qualche giorno e gli effetti precederanno le cause, o se esistono limiti fondamentali circa quello che gli umano possono sapere. Ci sono perfino bambini, ed io ho conosciuto alcuno che vogliono sapere a che cosa si somiglia un buco nero, o quale il pezzo più piccolo è della materia, o perché ricordiamo il passato e non il futuro, o come è che, se ci fu prima caos, esiste, apparentemente, ordine oggi, e, in definitiva, perché c'è un universo.

Nella nostra società continua ancora ad essere normale per i genitori ed i maestri rispondere a queste questioni con un restringimento di spalle, o con un riferimento a credenze religiose vagamente ricordate. Alcuni si sentono scomodi con questioni di questo tipo, perché ci mostrano vivacemente le limitazioni dell'intendimento umano.

Ma gran parte della filosofia e della scienza sono stati guidate per tali domande. Un numero crescente di adulti desiderano domandare questo tipo di questioni, e, occasionalmente, ricevono alcuni risposte sorprendenti. Equidistanti degli atomi e delle stelle, stiamo estendendo i nostri orizzonti esploratori per abbracciare tanto il molto piccolo come quello molto grande.

Nella primavera di 1974, circa due anni prima che la navicella spaziale Viking atterrasse su Marte, partecipai ad una riunione in Inghilterra, finanziata dalla Royal Society di Londra, per esaminare la questione di come cercare vita extraterrestre. Durante una pausa notai che si stava celebrando una riunione molto grande in un salone adiacente, nel quale entrai mosso per la curiosità. Subito mi resi conto che stava essendo testimone di un rito antichissimo, l'investitura di nuovi membri della Royal Society, una delle più antiche organizzazioni accademiche del pianeta. Nella prima fila, un giovane in una sedia a rotelle stava mettendo, molto lentamente, il suo nome in un libro che porta nelle sue prime pagine la firma di Isaac Newton. Quando alla fine finì, ci fu una commovente ovazione. Stephen Hawking era già una leggenda.

[2] nella versione aggiornata, questa introduzione non appare.

Hawking occupa ora la cattedra Lucasian di matematica dell'Università di Cambridge, un dato che fu occupato in un altro tempo per Newton e dopo per P.A.M. Dirac, due celebri esploratori del molto grande ed il molto piccolo. Egli è il suo prezioso successore. Questo, il primo libro di Hawking per il non specialista, è una fonte di soddisfazioni per l'udienza profana. Tanto interessante come i contenuti di gran portata del libro è la visione che proporziona dei meccanismi della mente del suo autore. In questo libro ci sono rivelazioni lucide sulle frontiere della fisica, l'astronomia, la cosmologia, ed il valore.
Si tratta anche di un libro circa Dio... o magari circa l'assenza di Dio. Il parola Dio riempie queste pagine.

Hawking si imbarca in una ricerca della risposta alla famosa domanda di Einstein su se Dio ebbe alcuno possibilità di scegliere creando l'universo. Hawking tenta, come egli stesso segnala, comprendere il pensiero di Dio. E questo fa che sia completamente inaspettata la conclusione del suo sforzo, almeno fino ad ora: un universo senza un bordo spaziale, senza principio né termine nel tempo, e senza posto per un Creatore.

Carl Sagan Università di Cornell, lthaca, New York

# Capitolo 1

## LA NOSTRA IMMAGINE DELL'UNIVERSO

Un noto scienziato, alcuni dicono che fu Bertrand Russell, dava una volta una conferenza sull'astronomia. In essa descriveva come la Terra girasse attorno al Sole e come questo, a sua volta, girasse attorno al centro di una vasta collezione di stelle conosciuta come la nostra galassia. Alla fine della chiacchierata, una simpatica signora avanzata in età si alzò e gli disse dal fondo della sala: "Quello che ci ha raccontato lei non è più che sciocchezze. Il mondo è in realtà una piattaforma piana sostentata sul guscio di una tartaruga gigante." Lo scienziato sorrise ampiamente prima di replicargli, "e su che cosa si appoggia la tartaruga?." "Lei è molto intelligente, giovane, molto intelligente - disse la signora -. Ma ci sono infinite tartarughe una sotto all'altra!."

La maggior parte della gente troverebbe abbastanza ridicola l'Immagine del nostro universo come una torre infinita di tartarughe, ma, in che cosa ci basiamo per credere che lo conosciamo meglio? . Che cosa sappiamo circa l'universo, e come siamo arrivati a saperlo? Da dove sorse l'universo, ed a dove va? Ebbe l'universo un principio, e, se così fu a cosa lui successe in precedenza? Quale è la natura del tempo? Arriverà qualche volta questo ad una fine? Progressi recenti della fisica, possibili in parte grazie a fantastiche nuove tecnologie, suggeriscono risposte ad alcune di queste domande che ci preoccupano da molto tempo. Qualche giorno queste risposte potranno sembrarci tanto ovvie come quello che la Terra giri attorno al Sole, o, magari, tanto ridicole come una torre di tartarughe. Solo il tempo, qualunque sia il suo significato, lo dirà.

Già nell'anno 340 A.C. il filosofo greco Aristotele, nel suo libro *Dei Cieli,* fu capace di stabilire due buoni argomenti per credere che la Terra era una sfera rotonda invece di una piattaforma piana. In primo luogo, si rese conto che le eclissi lunari erano dovute a che la Terra si situava tra il Sole e la Luna. L'ombra della Terra sulla Luna era sempre circolare. Se la Terra fosse stata un disco piano, la sua ombra sarebbe stato allungata ed ellittica a meno che l'eclissi si verificasse sempre nel momento in cui il Sole stesse direttamente sotto al centro del disco. In secondo luogo, i greci sapevano, a causa dei loro viaggi, che la stella Polare appariva più bassa nel cielo quando si osservava dal sud che quando si faceva da regioni più al nord. , Come la stella Polare sta sul polo nord, sembrerebbe essere giusto sopra ad un osservatore situato in detto polo, mentre ferma qualcuno che guardasse dall'equatore sembrerebbe essere giusto nell'orizzonte. A partire dalla differenza nella posizione apparente della stella Polare tra Egitto e Grecia, perfino Aristotele stimò che la distanza attorno alla Terra era di 400.000 stadi.

Non si conosce con esattezza quale valore era  un stadio, ma sembra che fosse di circa 200 metri, ciò supporrebbe che la stima di Aristotele era approssimativamente il doppio della llunghezza accettata oggigiorno. I greci avevano perfino un terzo argomento in favore che la Terra doveva essere rotonda, perché, se no, uno vede prima i pennoni di una barca che si avvicina nell'orizzonte, e solo dopo si vede lo scafo?

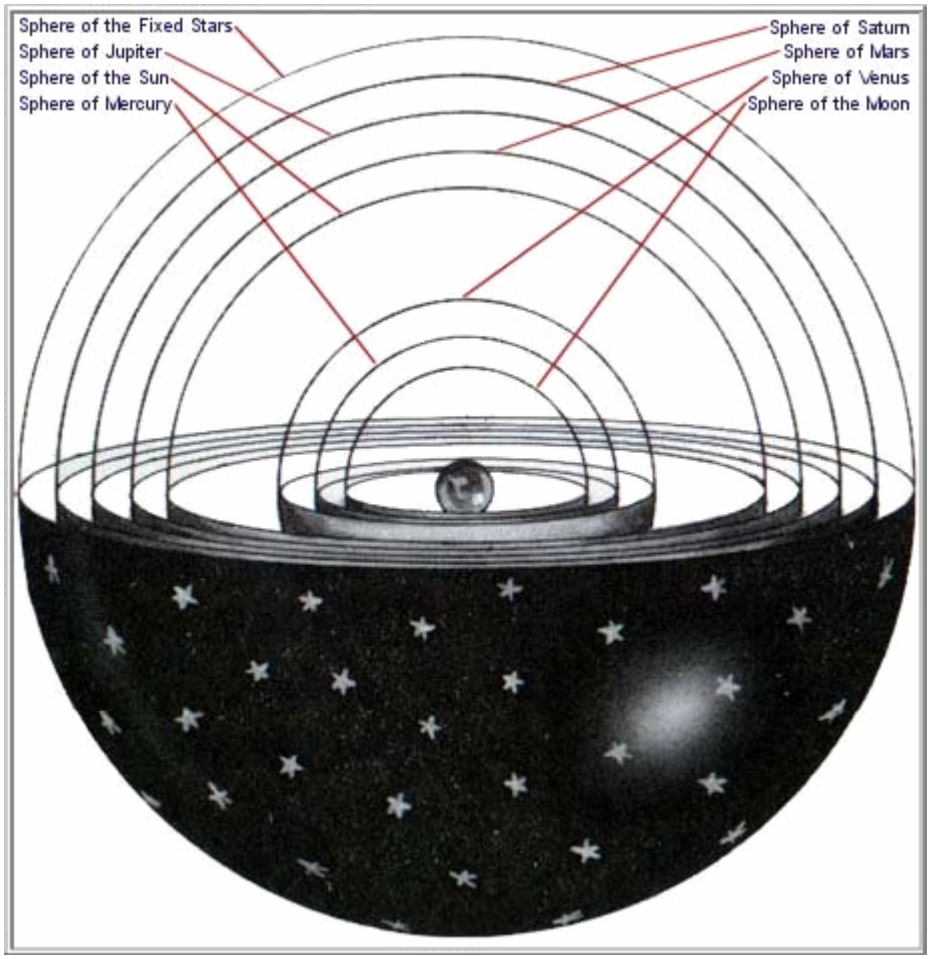



Figura 1:1

Aristotele credeva che la Terra era ferma e che il Sole, la luna, i pianeti e le stelle si muovevano in orbite circolari attorno a lei.  Credeva ciò perché era convinto, per ragioni mistiche, che la Terra era il centro dell'universo e che il movimento circolare era il più perfetto. Questa idea fu ampliata da Tolomeo nel secolo ii D.C. fino a costituire un modello cosmologico completo.  La Terra rimase nel centro, circondata per otto sfere che trasportavano la Luna, il Sole, le stelle ed i cinque pianeti conosciuti in quello tempo, Mercurio, Venere, Marte, Giove e Saturno, figura 1. l.  I pianeti si muovevano in circoli più piccoli concatenati nelle sue rispettive sfere affinché così potessero spiegarsi le suo traiettorie celesti relativamente complicate. La sfera più esterna trasportava le

stelle chiamate fisse, le quali rimanevano sempre nelle stesse posizioni relative, le une rispetto alle altre, girando unite attraverso il cielo. Quello che c'era dietro l'ultima sfera non fu mai descritto con chiarezza, ma certamente non era parte dell'universo osservabile per l'uomo.

Il modello di Tolomeo rappresentava un sistema ragionevolmente preciso per predire le posizioni dei corpi celesti nel firmamento. Ma, per potere predire correttamente dette posizioni, Tolomeo doveva supporre che la Luna seguiva un percorso che la situava in alcuni istanti due volte più vicino alla Terra che in altri. E questo significavo che la Luna dovrebbe apparire a volte con volume doppio del quale solitamente ha! Tolomeo riconosceva questa inconsistenza, nonostante il quale il suo modello fu ampiamente, benché non universalmente, accettato.  Fu adottato dalla Chiesa cristiana come l'immagine dell'universo che era in accordo con le Scritture, e che, inoltre, presentava il gran vantaggio di lasciare, dietro la sfera delle stelle fisse, un'enorme quantità di spazio per il cielo e l'inferno.

Un modello più semplice, tuttavia, fu proposto, in 1514, per un curato polacco, Nicolás Copérnico. , Al principio, magari per paura di essere tacciato di eretico dalla sua propria chiesa, Copernico fece circolare il suo modello di forma anonima.  La sua idea era che il Sole era stazionario nel centro e che la Terra ed i pianeti si muovevano in orbite circolari intorno ad esso. Passò quasi un secolo prima che la sua idea fosse presa davvero sul serio.  Allora due astronomi, il tedesco Johannes Kepler e l'italiano Galileo Galilei, incominciarono ad appoggiare pubblicamente la teoria copernicana, malgrado le orbite che prediceva non si adattassero fedelmente a quelle osservate. Il colpo mortale alla teoria aristotélico/ptolemaica arrivò in 1609.  In quell'anno, Galileo cominciò ad osservare il cielo notturno con un telescopio che aveva appena inventato. Quando guardò al pianeta Giove, Galileo trovò che questo era accompagnato per vari piccoli satelliti o lune che giravano intorno a suo. Questo implicava che non tutto girava direttamente attorno alla Terra, come Aristotele e Tolomeo avevano supposto. , Era ancora possibile, naturalmente, credere che le lune di Giove si muovessero in percorsi eccessivamente complicati attorno alla Terra, benché dessero l'impressione di girare intorno a Giove. Tuttavia, la teoria di Copernico era molto più semplice.  Allo stesso tempo, Johannes Kepler aveva modificato la teoria di Copernico, suggerendo che i pianeti non si muovevano in circoli, bensì in ellissi, un'ellisse è un circolo allungato. Le predizioni si adattavano ora finalmente alle osservazioni.
Dal punto di vista di Kepler, le orbite ellittiche costituivano meramente un'ipotesi *ad hoc,* e, in realtà, un'ipotesi abbastanza spiacevole, poiché le ellissi erano chiaramente meno perfette che i circoli. Kepler, scoprendo quasi per incidente che le orbite ellittiche si adattavano bene alle osservazioni, non potè riconciliarli con la sua idea che i pianeti erano concepiti per girare attorno al Sole attratti per forze magnetiche. Una spiegazione coerente fu solo trovata molto più tardi, in 1687, quando sir Isaac Newton pubblicò il suo *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica,* probabilmente l'opera più

importante delle scienze fisiche edita in tutti i tempi. In essa, Newton non presentò solo una teoria su come si muovono i corpi nello spazio e nel tempo, ma sviluppò anche la complicata matematica necessaria per analizzare quelli movimenti. Inoltre, Newton postulò la legge della gravitazione universale, in accordo con la quale ogni corpo nell'universo era attratto da qualunque altro corpo con una forza che era maggiore tanto maggiormente massicci fossero i corpi e quanto più vicino fossero l'uno all'altro. Era questa la stessa forza che rendeva possibile che gli oggetti cadessero a terra. La storia che Newton fu inspirato dauna mela che cadde sulla sua testa è quasi assicurazione apocrifa. Tutto quello che Newton stesso arrivò a dire fu che l'idea della gravità gli venne quando era seduto "in disposizione contemplativa", dalla quale "unicamente lo distrasse la caduta di una mela". Newton passò dopo a mostrare che, di accordo con la sua legge, la gravità è la causa che la Luna si muova in un'orbita ellittica attorno alla Terra, e che la Terra ed i pianeti seguano percorsi ellittici attorno al Sole.

Il modello copernicano si spogliò delle sfere celestiali di Tolomeo e, con esse, dell'idea che l'universo abbia una frontiera naturale. Poiché le "stelle fisse" non sembravano cambiare le sue posizioni, a parte una rotazione attraverso il cielo causata per il giro della Terra sul suo asse, arrivò ad essere naturale supporre che le stelle fisse erano oggetti come il nostro Sole, ma molto più lontani.

Newton comprese che, di accordo con la sua teoria della gravità, le stelle dovrebbero muoversi l'un l'altra, in modo che non sembrava possibile che potessero rimanere essenzialmente in riposo. Non arriverebbe un determinato momento nel quale tutte esse si riunirebbero? Nel 1691, in una lettera a Richard Bentley, altro imperturbabile pensatore della sua epoca, Newton argomentava che veramente questo succederebbe se ci fosse solo un numero finito di stelle distribuite in una regione finita dello spazio. Ma ragionava che se, al contrario, ci fosse un numero infinito di stelle, distribuite più o meno uniformemente su un spazio infinito, ciò non succederebbe, perché non ci sarebbe nessun punto centrale dove agglutinarsi.
Questo argomento è un esempio del tipo di difficoltà che uno può trovare quando si discute circa l'infinito. In un universo infinito, ogni punto può essere considerato come il centro, poiché ogni punto ha un numero infinito di stelle ad ogni lato. L'approccio corretto, che fu solo scoperta molto più tardi, è considerare in primo luogo una situazione finita, nella quale le stelle tenderebbero ad agglutinarsi, e domandarsi dopo come cambia la situazione quando uno aggiunge più stelle uniformemente distribuite fuori della regione considerata. Di accordo con la legge di Newton, gli stelle extra non produrrebbero, in generale, nessun cambiamento sulle stelle originali che pertanto si continuerebbero agglutinandosi con la stessa rapidità. Possiamo aggiungere tante stelle come vogliamo che nonostante ciò le stelle originali seguiranno unendosi indefinitamente. Questo c'assicura che è impossibile avere un modello statico ed infinito dell'universo, nel quale la gravità sia sempre attrattiva.

Un dato interessante sulla corrente generale del pensiero anteriore al secolo xx è che nessuno avesse suggerito che l'universo si stesse espandendo o contraendo. Era generalmente accettato che l'universo, oppure era esistito per sempre in un stato immobile, oppure era stato creato, più o meno come l'osserviamo oggi, in un determinato tempo scorso finito. In parte, questo può doversi alla tendenza che abbiamo le persone a credere in verità eterne, tanto quanto alla consolazione che ci proporziona la credenza che, benché possiamo invecchiare e morire, l'universo rimane eterno ed immobile.

Perfino quelli che compresero che la teoria della gravità di Newton mostrava che l'universo non poteva essere statico, non pensarono di suggerire che si potrebbe stare espandendo. Al contrario, cercarono di modificare la teoria supponendo che la forza gravitazionale fosse repulsiva a distanze molto grandi. Ciò non colpiva significativamente le sue predizioni sul movimento dei pianeti, ma permetteva che una distribuzione infinita di stelle potesse rimanere in equilibrio, con le forze attraenti tra stelle vicine equilibrate per le forze repulsive tra stelle lontane. Tuttavia, oggigiorno crediamo che tale equilibrio sarebbe instabile: se le stelle in alcuno regione si avvicinasse solo leggermente alcune ad altre, le forze attraenti tra esse diventerebbero più forti e dominerebbero sulle forze repulsive, in modo che le stelle, una volta che incominciassero ad agglutinarsi, lo seguirebbero facendo per sempre.  Al contrario, se le stelle incominciassero a separarsi un po' tra sé, le forze repulsive dominerebbero allontanando indefinitamente ad alcune stelle di altre.

Un'altra obiezione ad un universo statico infinito è normalmente attribuita al filosofo tedesco Heinrich Olbers che scrisse su tale  modello nel 1823.  In realtà, vari contemporanei di Newton avevano considerato già il problema, e l'articolo di Olbers non fu neanche il primo a contenere argomenti plausibili contro il precedente modello. Fu, tuttavia, il primo ad essere ampiamente conosciuto. L'obiezione alla quale ci riferivamo poggia sul fatto che, in un universo statico infinito, praticamente ciascuna linea di visione finirebbe sulla superficie di una stella. Così, sarebbe da opinare che tutto il cielo fosse, perfino di notte, tanto brillante come il Sole. Il contraargomento di Olbers era che la luce delle stelle lontane sarebbe oscurata per l'assorbimento dovuto alla materia intermedia. Tuttavia, se quello succedesse, la materia intermedia si riscalderebbe, col tempo, fino a che illuminasse di forma tanto brillante come le stelle. L'unica maniera di evitare la conclusione che tutto il cielo notturno debba essere tanto brillante come la superficie del Sole sarebbe supporre che le stelle non stanno illuminando da sempre, ma si accesero in un determinato istante passato finito. In questo caso, la materia assorbente non potrebbe stare scaldi ancora, o la luce delle stelle distanti non c'avrebbe potuti raggiungere ancora. E questo ci condurrebbe alla questione di che cosa avrebbe potuto causare il fatto che le stelle si fossero accese per la prima volta.

Il principio dell'universo era stato discusso, naturalmente, molto prima di questo. Di accordo con distinte cosmologie primitive e con la tradizione judeo cristiana musulmana- , l'universo cominciò in un certo tempo scorso finito, e non molto lontano. Un argomento in favore di un'origine tale fu la sensazione che era necessario avere una "Causa Prima" per spiegare l'esistenza dell'universo. , Dentro l'universo, uno spiega sempre un avvenimento come causato per qualche altro avvenimento anteriore, ma l'esistenza dell'universo in sé, potrebbe essere solo spiegata di questa maniera se avesse un'origine.  Un altro argomento lo diede sant' Agostino nel suo libro *La città di Dio.* Segnalava che la civiltà sta progredendo e che possiamo ricordare chi realizzò questa impresa o sviluppò quella tecnica. Così, l'uomo, e pertanto magari anche l'universo, non era potuto esistere dietro da molto tempo.  Sant'Agostíno, di accordo col libro del Genesi, accettava una data di circa 5.000 anni prima di Cristo per la creazione dell'universo. , È interessante comprovare che questa data non sta molto lontano dal fine dell'ultimo periodo glaciale, sul 10.000 A.C. che è quando gli archeologi suppongono che realmente incominciò la civiltà.

Aristotele, e la maggior parte del resto dei filosofi greci, non era a favore, al contrario, dell'idea della creazione, perché suonava troppo ad intervento divino. Essi credevano, quindi, che la razza umana ed il mondo che la circonda erano esistiti, ed esisterebbero, per sempre. Gli antichi avevano considerato già l'argomento descritto sopra circa il *progresso,* e l'avevano risolto dicendo che c'erano stati inondazioni periodiche o altri disastri che ripetutamente situavano alla razza umana nel principio della civiltà.
Le questioni di se l'universo ha un principio nel tempo e di se è limitato nello spazio furono posteriormente vagliate di forma estensiva per il filosofo Immanuel Kant nella sua monumentale, e molto oscura, opera, *Critica della ragione pura*, edita in 1781. Egli chiamò  queste questioni antinomie, cioè, contraddizioni, della ragione pura, perché gli sembrava che c'erano argomenti altrettanto convincenti per credere tanto nella tesi che l'universo ha un principio, come nell'antitesi che l'universo era esistito sempre. Il suo argomento in favore della tesi era che se l'universo non avesse avuto un principio, ci sarebbe stato un periodo di tempo infinito anteriore a qualunque avvenimento, quello che egli considerava assurdo. L'argomento in pro dell'antitesi era che se l'universo avesse avuto un principio, ci sarebbe stato un periodo di tempo infinito anteriore a lui, ed in questo modo, perché dovrebbe incominciare in una volta l'universo in questione? In realtà, i suoi ragionamenti in favore della tesi e dell'antitesi sono realmente lo stesso argomento. Ambedue sono basati nella supposizione implicita che il tempo continua all'indietro indefinitamente, tanto se l'universo è esistito da sempre come se no. Come vedremo, il concetto di tempo non ha significato prima del principio dell'universo. Questo era stato già segnalato in primo luogo per sant' Agostino. Quando gli fu domandato: Che cosa faceva Dio prima che creasse l'universo? Sant' Agostino rispose: stava preparando l'inferno per quelli quale domandassero tali questioni. Nel suo posto, disse che il tempo era una proprietà dell'universo che Dio aveva creato, e che il tempo non esisteva in precedenza all'inizio dell'universo.

Quando la maggior parte della gente credeva in un universo essenzialmente statico ed immobile, la domanda di se questo aveva, o no, un principio era realmente una questione di carattere metafisico o teologico.  Potevano spiegarsi altrettanto bene tutte le osservazioni tanto con la teoria che l'universo era esistito sempre, come con la teoria che era stato messo in funzionamento in un determinato tempo finito, di tale forma che sembrasse come se fosse esistito da sempre.  Ma, in 1929, Edwin Hubble fece l'osservazione cruciale che, dove voglia che uno guardi, le galassie distanti si stanno allontanando da noi. O in altre parole, l'universo si sta espandendo. Questo significa che in epoche anteriori gli oggetti sarebbero dovuti essere più insieme tra sé. In realtà, sembra essere che ci fu un tempo, fa circa dieci o venti mille milioni di anni, in cui tutti gli oggetti stavano esattamente nello stesso posto, e nel che, pertanto, la densità dell'universo era infinita. Fu detta scoperta quello che finalmente portò la questione del principio dell'universo ai domini della scienza.

Le osservazioni di Hubble suggerivano che ci fu un tempo, chiamato il *big bang* [gran esplosione o esplosione primordiale] in cui l'universo era infinitésimamente piccolo ed infinitamente denso. Fissate tali condizioni in quel momento, tutte le leggi della scienza, e, pertanto, ogni capacità di predizione del futuro, si sgretolerebbero. Se ci fossero stati avvenimenti anteriori a questo non potrebbero infuire in nessun modo su quello che succede al presente. La sua esistenza potrebbe essere ignorata, poiché ciò non provocherebbe conseguenze osservabili. Uno potrebbe dire che il tempo ha la sua origine nel *big bang,* nel senso che i tempi anteriori semplicemente non sarebbero definiti. È segnalare che questo principio del tempo è radicalmente differente di quelli previamente considerati. In un universo immobile, un principio del tempo è qualcosa che deve essere imposto da un essere esterno all'universo; non esiste la necessità di un principio. Uno può immaginarsi che Dio creó l'universo in, testualmente, qualunque istante di tempo. Al contrario, se l'universo si sta espandendo, possono esistere poderose ragioni fisiche affinché debba c'essere un principio. Uno potrebbe immaginarsi ancora che Dio creó l'universo nell'istante del *big bang,* ma non avrebbe senso supporre che l'universo fosse stato creato prima del *big bang.* Universo in espansione non escludi l'esistenza di un creatore, ma sì stabilisci limiti su quando questo aveva potuto portare a termine la sua missione!

Per potere analizzare la natura dell'universo, e potere discutere questioni tali come se c'è stato un principio o se ci sarà un fine, è necessario avere chiaro quello che è una teoria scientifica. Consideriamo qui un punto di vista ingenuo, nel quale una teoria è semplicemente un modello dell'universo, o di una parte di lui, ed un insieme di regole che riferiscono le grandezze del modello con le osservazioni che realizziamo.  Questo esiste solo nelle nostre menti, e non ha nessuna altra realtà, chiunque sia quello che questo possa significare. Una teoria è una buona teoria purché soddisfaccia due requisiti: deve descrivere con precisione un ampio insieme di osservazioni sulla base di un modello che contenga solo pochi parametri arbitrari, e deve essere capace di

predire positivamente i risultati di osservazioni future. Per esempio, la teoria di Aristotele che tutto era costituito per quattro elementi, terra, aria, fuoco ed annacqua, era il sufficientemente semplice come per essere qualificato come tale, ma falliva in che non realizzava nessuna predizione concreta. Al contrario, la teoria della gravità di Newton era basata in un modello perfino più semplice, nel quale i corpi si accattivavano tra sé con una forza proporzionale ad una quantità chiamata massa ed inversamente proporzionale al quadrato della distanza tra essi, nonostante il quale era capace di predire il movimento del Sole, la Luna ed i pianeti con un alto grado di precisione.

Qualunque teoria fisica è sempre provvisoria, nel senso che è solo un'ipotesi: non può provarsi mai. Malgrado i risultati degli esperimenti concordino molte volte con la teoria, non potremo mai essere sicuri che la prossima volta il risultato non la contraddica. Tuttavia, può respingersi una teoria non appena si trovi un'unica osservazione che contraddica le sue predizioni. Come ha sottolineato il filosofo della scienza Karl Popper, una buona teoria è caratterizzata per il fatto di predire un gran numero di risultati che possono essere confutati in principio o invalidati per l'osservazione. Ogni volta che si verifica che un nuovo esperimento è di accordo con le predizioni, la teoria sopravvive e la nostra fiducia in lei aumenta. Ma se al contrario si realizza qualche volta una nuova osservazione che contraddica la teoria, dovremo abbandonarla o modificarla. 0 almeno questo è quello che si suppone che deve succedere, benché uno possa discutere sempre la competenza della persona che realizzò l'osservazione.

Nella pratica, quello che succede è che si costruisce una nuova teoria che è un'estensione della teoria originale in realtà. Per esempio, osservazioni tremendamente precise del pianeta Mercurio rivelano una piccola differenza tra il suo movimento e le predizioni della teoria della gravità di Newton. La teoria della relatività generale di Einstein prediceva un movimento di Mercurio leggermente distinto di quello della teoria di Newton. Il fatto che le predizioni di Einstein si adattassero alle osservazioni, mentre quelle di Newton non lo facevano, fu una delle conferme cruciali della nuova teoria. Tuttavia, continuiamo ad usare la teoria Newton per tutti i propositi pratici poiché le differenze tra le sue predizioni e quelle della relatività generale sono molto piccole nelle situazioni che normalmente ci spettano. , Anche la teoria di Newton possiede il gran vantaggio di essere molto più semplice e maneggevole di quella di Einstein,

L'obiettivo finale della scienza è il proporzionare un'unica che descriva correttamente tutto l'universo. Tuttavia, il metodo che la maggioranza degli scienziati segue in realtà è quello di separare il problema in due parti.  In primo luogo, stanno le leggi che ci dicono come cambia l'universo col tempo. , Se conosciamo come l'universo è in un istante dato, questi lievi fisiche ci diranno come l'universo sarà in qualunque altro posteriore.  Secondo, sta la questione dello stato iniziale dell'universo.  Alcuni persone

credono che la scienza dovrebbe occuparsi unicamente della prima parte: considerano il tema della situazione iniziale dell'universo come obietto della metafisica o la religione. Essi argomenterebbero che Dio, all'essere onnipotente, avrebbe potuto iniziare l'universo della maniera che più gli sarebbe piaciuto. Può essere che sì, ma in quello caso egli anche c'essere la cosa fatta evolvere di un modo completamente arbitrario. Invece, sembra essere che scegliesse farlo evolvere di una maniera molto regolare seguendo certe leggi.  Risulta, perciò, altrettanto ragionevole supporre che ci sono anche leggi che governano lo stato iniziale.

È molto difficile costruire un'unica teoria capace di descrivere tutto l'universo. Invece di ciò, ci vediamo forzati, per il momento, a dividere il problema in varie parti, inventando un certo numero di teorie parziali. Ognuna di queste teorie parziali descrive e predice una certa classe restretta di osservazioni, disprezzando gli effetti di altre quantità, o rappresentando queste per semplici insiemi di numeri. Può succedere che questo avvicinamento sia completamente erronea. Se tutto nell'universo dipende assolutamente da tutto il resto di lui in una maniera fondamentale, potrebbe risultare impossibile avvicinarsi ad una soluzione completa investigando parti isolate dal problema. Tuttavia, questo è certamente il modo in cui abbiamo progredito nel passato. L'esempio classico è di nuovo la teoria della gravità di Newton, la quale ci dice che la forza gravitazionale in due corpi dipende unicamente di un numero associato ad ogni corpo, la sua massa, essendo per il resto indipendente del tipo di sostanza che forma il corpo. Così, non si deve avere una teoria della struttura e costituzione del Sole ed i pianeti per potere determinare le sue orbite.

Gli scienziati attuali descrivono l'universo attraverso due teorie parziali fondamentali: la teoria della relatività generale e la meccanica quantica. Esse costituiscono il gran risultato intellettuale della prima metà di questo secolo.  La teoria della relatività generale descrive la forza della gravità e la struttura a gran scala dell'universo, cioè, la struttura a scale che vanno solo da pochi chilometri fino ad un miliardo di miliardi, un 1 con ventiquattro zeri dietro, di chilometri, il volume dell'universo osservabile. La meccanica quantica, al contrario, si occupa dei fenomeni a scale eccessivamente piccole, tali come una miliardesimo di centimetro. Sfortunatamente, tuttavia, si sa che queste due teorie sono inconsistenti tra sé: entrambe non possono essere corrette contemporaneamente. Uno dei maggiori sforzi della fisica attuale, ed il tema principale di questo libro, è la ricerca di una nuova teoria che incorpori alle due anteriori: una teoria quantica della gravità.  Non si disporsi ancora di tale teoria, e ferma ciò ancora può rimanere una lunga strada da percorrere, ma sì si conoscono molte delle proprietà che deve possedere. In capitoli posteriori vedremo che si sa già relativamente abbastanza circa le predizioni che deve fare una teoria quantica della gravità.

Se si ammette allora che l'universo non è arbitrario, ma è governato per certe leggi ben definite, bisognerà combinare alla fine le teorie parziali in una teoria unificatrice

completa che descriverà tutti i fenomeni dell'universo. Esiste, nonostante, un paradosso fondamentale nella nostra ricerca di questa teoria unificatrice completa. Le idee anteriormente profilate sulle teorie scientifiche suppongono che siamo esseri razionali, liberi per osservare l'universo ci piaccia come e per estrarre deduzioni logiche di quello che vediamo. In tale schema sembra ragionevole supporre che potremmo continuare progredendo indefinitamente, avvicinandoci sempre di più alle leggi che governano l'universo.  Ma se realmente esistesse una teoria unificatrice completa, anche questa determinerebbe presumibilmente le nostre azioni. Così la teoria stessa determinerei il risultato della nostra ricerca di lei! E perché ragione dovrebbe determinare che giungessimo alle vere conclusioni a partire dall'evidenza che ci presenta? È che non potrebbe determinare altrettanto bene che estraessimo conclusioni erronee? O perfino che non estraessimo in assoluto nessuna conclusione?

L'unica risposta che posso dare a questo problema si basa sul principio della selezione naturale di Darwin. L'idea poggia in che in qualunque popolazione di organismi autorreproductores, ci saranno variazioni tanto nel materiale genétíco come in educazione dei differenti individui.  Queste differenze supporranno che alcuni individui siano più capaci di altri per estrarre le conclusioni corrette circa il mondo che circonda, e per agire di accordo con esse. Detti individui avranno più possibilità di sopravvivere e riprodursisi, in modo che il suo schema mentale e di condotta finirà per imporsisi. Nel passato è stato certo che quello che chiamiamo intelligenza e scoperta scientifica hanno supposto un vantaggio nell'aspetto della sopravvivenza. Non è completamente evidente che questo debba continuare ad essere così: le nostre scoperte scientifiche potrebbero distruggerci a tutti perfettamente, e, perfino se non lo fanno, una teoria unificatrice completa non ha perché supporre nessun cambiamento nella cosa relativa alle nostre possibilità di sopravvivenza.  Tuttavia, dato che l'universo ha evoluto di un modo regolare, potremmo sperare che le capacità di ragionamento che la selezione naturale ci ha dato continuino ad essere valide nella nostra ricerca di una teoria unificatrice completa, e non ci conducano a conclusioni erronee.

Dato che le teorie che possediamo già sono sufficienti per realizzare predizioni esatte di tutti i fenomeni naturali, eccetto dei più estremi, la nostra ricerca della teoria definitiva dell'universo sembra difficile da giustificare da un punto di vista pratico. , È interessante segnalare, tuttavia, che argomenti simili potrebbero aversi usati contro la teoria della relatività e della meccanica quantica, ci sono stati dati l'energia nucleare e la rivoluzione della microelettronica.  Perciò, la scoperta di una teoria unificatrice completa non può aiutare alla sopravvivenza della nostra specie. Non può colpire perfino il nostro modo di vita. Ma sempre, dall'origine della civiltà, la gente non si è accontentata con vedere gli avvenimenti come staccati ed inspiegabili. Ha cercato incessantemente una conoscenza dell'ordine soggiacente del mondo. Oggigiorno, continuiamo ancora ad anelare sapere perché stiamo qui e da dove veniamo. Il profondo desiderio di conoscenza dell'umanità è giustificazione sufficiente per

continuare la nostra ricerca. E questa non cesserà fino a che possediamo una descrizione completa dell'universo nel quale viviamo.

# Capitolo 2

## SPAZIO E TEMPO

Le nostre idee attuali circa il movimento dei corpi salgono a Galileo e Newton. Prima di essi, si credeva nelle idee di Aristotele chi diceva che lo stato naturale di un corpo era stare in riposo e che questo si muoveva solo se era spinto per una forza o un impulso. Di ciò si deduceva che un corpo pesante doveva cadere più rapido di uno leggero, perché soffriva un'attrazione maggiore verso la terra.

Anche la tradizione aristotelica manteneva che potrebbero dedurrsi tutte le leggi che governano l'universo per mezzo del pensiero puro: non era necessario comprovarli per mezzo dell'osservazione. Così, nessuno prima di Galileo si preoccupò di vedere se i corpi con pesi differenti cadevano con velocità differenti. Si dice che Galileo dimostrò che le anteriori idee di Aristotele erano false lasciando cadere differenti pesi dalla torre inclinata da Pisa. È quasi sicuro che questa storia non è certo, benché quello che sì fece Galileo fu qualcosa di equivalente: lasciò cadere palle di distinti pesi durante un piano inclinato. La situazione è molto simile a quella dei corpi pesanti che cadono verticalmente, ma è più facile da osservare perché le velocità sono minori. Le misurazioni di Galileo indicarono che ogni corpo aumentava la sua velocità allo stesso ritmo, indipendentemente del suo peso. Per esempio, se si scioglie una palla in una pendenza che discende un metro per ogni dieci metri di percorso, la palla cadrà per la pendenza con una velocità da un metro per secondo dopo un secondo, di due metri per secondo dopo due secondi, e così via, senza importare la cosa pesante che sia la palla. Ovviamente che una palla di piombo cadrà più rapida di una piuma, ma ciò si deve unicamente a che la piuma è frenata per la resistenza dell'aria. Se uno sciogliesse due corpi che non presentasse troppa resistenza all'aria, tali come due pesi differenti di piombo, cadrebbero con la stessa rapidità.

Le misurazioni di Galileo servirono da base a Newton per l'ottenimento delle sue leggi del movimento. Negli esperimenti di Galileo, quando un corpo cadeva ruzzoloni, agiva sempre su lui la stessa forza, il suo peso, e l'effetto che si produrs consisteva in accelerarlo di forma costante. Questo dimostrava che l'effetto reale di una forza era quello di cambiare la velocità il corpo, invece di semplicemente metterlo in movimento, come si pensava anteriormente. Anche ciò significava che purché su un corpo non agisse nessuna forza, questo si manterrebbe muovendosi in una linea retta con la stessa velocità. Questa idea fu formulata esplicitamente per la prima volta in li *Comincia Mathematica* di Newton, editi in 1687, e si conosce come prima legge di Newton. Quello che succede ad un corpo quando su lui agisce una forza è raccolto nella seconda legge di Newton. Questa afferma che il corpo si sbrigherà, o cambierà sir velocità, ad un ritmo proporzionale alla forza. , Per esempio, l'accelerazione si

raddoppierà quando la forza applicata sia doppia.  Allo stesso tempo, l'accelerazione diminuirà quando aumenti la massa, o la quantità di materia, del corpo. , La stessa forza agendo su un corpo di doppia massa che un altro, produrrà la metà di accelerazione nel prima che nel secondo.  Un esempio familiare l'abbiamo in un'automobile: quanto più potente sia il suo motore maggiore accelerazione possiederà, ma quanto più pesante sia l'automobile minore accelerazione avrà con lo stesso motore.

Oltre alle leggi del movimento, Newton scoprì una legge che descriveva la forza della gravità, una legge che ci dice che ogni corpo attrae a tutti gli altri corpi con una forza proporzionale alla massa di ognuno di essi.  Così, la forza corpi si raddoppierà in due se uno di essi, diciamo, il corpo A, piega la sua massa. Questo è quello che potrebbe sperarsi ragionevolmente, poiché uno può supporre al nuovo corpo A formato per due corpi, ognuno di essi con la massa originale.  Ognuno di questi corpi attrarrà al corpo B con la forza originale. Pertanto, la forza totale entri Ad e B sarà giusto il doppio che la forza originale. E se, per esempio, uno dei corpi avesse una massa doppia dell'originale e l'altro corpo una massa tre volte maggiore che all'inizio, la forza tra essi sarebbe sei volte più intensa dell'originale. Può vedersi ora perché tutti i corpi cadono con la stessa rapidità: un corpo che abbia doppio peso soffrirà una forza gravitazionale doppio, ma contemporaneamente avrà una massa doppia. Di accordo con la seconda legge di Newton, questi due effetti si cancelleranno esattamente e l'accelerazione sarà la stessa in entrambi i casi.

La legge della gravità di Newton ci dice anche che quanto più separati siano i corpi minori sarà la forza gravitazionale tra essi. La legge della gravità di Newton stabilisce che l'attrazione gravitazionale prodotta per una stella ad una certa distanza è esattamente la quarta parte della quale produrrebbe una stella simile alla metà di distanza. Questa legge predice con gran precisione le orbite della Terra, la Luna ed i pianeti. Se la legge fosse che l'attrazione gravitazionale di una stella decadesse più rapidamente con la distanza, le orbite dei pianeti non sarebbero ellittiche, ma questi continuerebbero a cadere in spirale verso il Sole. Se, al contrario, l'attrazione gravitazionale decadesse più lentamente, le forze gravitazionali dovute alle stelle lontane dominerebbero di fronte all'attrazione della Terra.

La differenza fondamentale tra le idee di Aristotele e quelle di Galileo e Newton poggia in che Aristotele credeva in un stato superiore di riposo, nel quale tutte le cose sottostarebbero, a meno che fossero spinte per una forza o impulso.  In questione, egli credè che la Terra stava in riposo. Al contrario, delle leggi di Newton si stacca che non esiste un unico standard di riposo. Può supporrsi ugualmente o che il corpo A sta in riposo ed il corpo B si muove a velocità costante con rispetto ad A, o che il B sta in riposo e è il corpo Al quale si muove. Per esempio, se uno si dimentica per il momento della rotazione della Terra e della sua orbita attorno al Sole, si può dire che la Terra sta

in riposo e che un treno su lei sta viaggiando verso il nord a cento quaranta chilometri per ora, o si può dire ugualmente che il treno sta in riposo e che la Terra si muove verso il sud a cento quaranta chilometri per ora. Se si realizzassero esperimenti nel treno con oggetti che si muovessero, comproveremmo che tutte le leggi di Newton continuerebbero ad essere valide. Per esempio, giocando a ping-pong nel treno, uno troverebbe che la palla obbedisce alle leggi di Newton esattamente uguale a come lo farebbe in un tavolo situato vicino alla via. Pertanto, non c'è forma di distinguere se è il treno o è la Terra quello che si muove.

La mancanza di un standard assoluto di riposo significava che non poteva determinarsi se due avvenimenti che succedessero in tempi differenti avevano avuto luogo nella stessa posizione spaziale. Per esempio, supponiamo che nel nostro treno palla di ping-pong sta varando, muovendosi verticalmente verso l'alto e verso il basso e battendo il tavolo due volte nello stesso posto con un intervallo di un secondo. Per un osservatore situato vicino alla via, le due scialuppe sembreranno avere luogo con una separazione di circa quaranta metri, poiché il treno avrà percorso quella distanza tra le due scialuppe. Perciò non l'esistenza di un riposo assoluto significa che non può associarsi una posizione assoluta nello spazio con un evento, come Aristotele aveva creduto. Le posizioni degli eventi e la distanza tra essi saranno differenti per una persona nel treno e per altra che stia di fianco alla via, e non esiste ragione per preferire il punto di vista di una delle persone di fronte a quello dell'altra.

Newton fu molto preoccupato per questa mancanza di una posizione assoluta, o spazio assoluto, come l'ero chiamato, perché non concordava con la sua idea di un Dio assoluto. In realtà, ricusò accettare la non esistenza di un spazio assoluto, a pesare perfino che era implicata per le sue proprie leggi. Fu duramente criticato da molta gente dovuto a questa credenza irrazionale, sottolineando soprattutto la critica del vescovo Berkeley, un filosofo che credeva che tutti gli oggetti materiali, insieme allo spazio ed il tempo, erano un'illusione. Quando il famoso Dr. Johnson venne a sapere dell'opinione di Berkeley gridò "Il ribatto così!" e battè con la punta del piede una gran pietra.
Tanto Aristotele come Newton credevano nel tempo assoluto. Cioè, ambedue pensavano che poteva affermarsi inequivocabilmente la possibilità di misurare in due l'intervallo di tempo eventi senza ambiguità, e che detto intervallo sarebbe lo stesso per tutti quelli che lo misurassero, purché usassero un buon orologio. Il tempo era completamente separato ed era indipendente dello spazio. Questo è, in realtà, quello che la maggioranza della gente considererebbe come di buonsenso. Tuttavia, abbiamo dovuto cambiare le nostre idee circa lo spazio e del tempo. Benché le nostre nozioni di quello che sembra essere il buonsenso funzionino bene quando si usano nello studio il movimento delle cose, tali come mele o pianeti che viaggiano relativamente lente, non funzionano, in assoluto, quando si applicano a cose che si muovono con o vicino alla velocità della luce.

Il fatto che la luce viaggia ad una velocità finita, benché molto elevata, fu scoperto in 1676 per l'astronomo danese Ole Christensen Roemer. Egli osservò che i tempi nei quali le lune di Giove sembravano passare di dietro di questo non stavano regolarmente spaziature, come sarebbe di sperare se le lune girassero attorno a Giove con un ritmo costante. Dato che la Terra e Giove girano attorno al Sole, tra tutti e due la distanza varia.  Roemer notò che le eclissi delle lune di Giove sembrano succedere tanto più tardi quanto più distanti di Giove stiamo. Argomentò che si doveva a che la luce proveniente delle lune tardava più in arrivarnoi lontano stavamo quanto più di esse.  Suoi dosate sulle variazioni delle distanze della Terra a Giove non erano, tuttavia, troppo buone, e così stimò un valore per la velocità della luce di 225.000 chilometri per secondo, comparato col valore moderno di 300.000 chilometri per secondo.  Nonostante, non solo il risultato di Roemer di provare che la luce viaggia ad una velocità finita, ma anche di misurare quella velocità, fu notevole, soprattutto tenendo in conto che questo succedeva undici anni prima che Newton pubblicasse i *Comincia Mathematica.*

Una vera teoria della propagazione della luce non sorse fino a 1865 in cui il fisico britannico James Clerk Maxwell riuscì ad unificare con successo le teorie parziali che fino ad allora si erano usati per definire le forze dell'elettricità ed il magnetismo. Le equazioni di Maxwell predicevano che potevano esistere perturbazioni di carattere ondulatorio del campo elettromagnetico combinato, e che queste viaggerebbero a velocità costante, come le onde di una zattera. Se tali onde possiedono una longitudine di onda, la distanza tra una cresta di onda ed il seguente, di un metro o più, costituiscono quello che oggigiorno chiamiamo onde di radio. Quelli con longitudini di onda minori si chiamano microonde, pochi centimetri, o infrarosse, più di una diezmilésima di centimetro.  La luce visibile ha solo una longitudine di onda di tra quaranta ed ottanta milionesimo di centimetro. Le onde con minori longitudini si conoscono ancora come radiazione ultravioletta, raggi X e raggi gamma.
La teoria di Maxwell prediceva che tanto le onde di radio come le luminose dovrebbero viaggiare ad una velocità fissa determinata. La teoria di Newton si era staccata, tuttavia, di un sistema di riferimento assoluto, di tale forma che se si supponeva che la luce viaggiava ad una certa velocità fissa, bisognava specificare rispetto a che sistema di riferimento si misurava detta velocità. Affinché questo avesse senso, si suggerì da tutte le parti l'esistenza di una sostanza chiamato "etere" che era presente, perfino nello spazio "vuoto."  Le onde di luce dovevano viaggiare attraverso l'etere come le onde di suono lo fanno attraverso l'aria, e le sue velocità dovrebbero essere, pertanto, relative all'etere. Differenti osservatori che si muovessero con relazione all'etere, vedrebbero avvicinarsi la luce con velocità distinte, ma la velocità della luce rispetto all'etere rimarrebbe fissa. In questione, dato che la Terra si muoveva attraverso l'etere nella sua orbita attorno al Sole, la velocità della luce dosata nella direzione del movimento della Terra attraverso l'etere, quando ci stessimo muovendo verso la fonte luminosa, dovrebbe essere maggiore che la velocità della luce nella direzione

perpendicolare a quello movimento, quando ci non stessimo muovendo verso la fonte. In 1887, Albert Michelson, chi più tardi fu il primo nordamericano che ricevè il premio Nobel di fisica, ed Edward Morley portò a termine un' esperimento molto accurato nella Sposi School of Applied Science, di Cleveland. Essi paragonarono la velocità della luce nella direzione del movimento della Terra, con la velocità della luce nella direzione perpendicolare a detto movimento. Per la sua sorpresa trovarono che entrambe le velocità erano esattamente uguali!

Tra 1887 e 1905, ci furono diversi tentativi, i più importanti dovuti al fisico olandese Hendrik Lorentz, di spiegare il risultato dell'esperimento di Michelson-Morley in termini di contrazione degli oggetti o di ritardo degli orologi quando questi si muovono attraverso l'etere. Tuttavia, in 1905, in un famoso articolo Albert Einstein, fino ad allora un sconosciuto impiegato dell'ufficio di brevetti della Svizzera, segnalò che l'idea dell'etere era completamente non necessaria, purché si fosse disposto ad abbandonare l'idea di un tempo assoluto. Una proposta simile fu realizzata alcune settimane dopo per un distaccato matematico francese, Henri Poincaré. Gli argomenti di Einstein avevano un carattere più fisico di quelli di Poincaré che aveva studiato il problema da un punto di vista puramente matematico. Ad Einstein lo è riconosciuto come il creatore della nuova teoria, mentre a Poincaré gli è ricordato da avere dato il suo nome ad una parte importante della teoria.

Il postulato fondamentale della teoria della relatività, nome di questa nuova teoria, era che le leggi della scienza dovrebbero essere le stesse per tutti gli osservatori in movimento libero, indipendentemente di quale fuori la sua velocità. Questo era già certo per le leggi di Newton, ma ora si estendeva l'idea per includere anche la teoria di Maxwell e la velocità della luce: tutti gli osservatori dovrebbero misurare la stessa velocità della luce senza importare la rapidità con la quale si stessero muovendo. Questa idea tanto semplice ha alcuni conseguenze straordinarie. Magari le più conosciute siano l'equivalenza tra massa ed energia, riassunta nella famosa equazione di Einstein *E=mc2 dove* E è l'energia, m, la massa e *c,* la velocità della luce, e la legge che nessun oggetto può viaggiare ad una velocità maggiore che quella della luce. Dovuto all'equivalenza tra energia e massa, l'energia che un oggetto acquisisce dovuto al suo movimento si aggiungerà alla sua massa, incrementandola. In altre parole, quanto maggiore sia la velocità di un oggetto più difficile sarà aumentare la sua velocità. Questo effetto è solo realmente significativo per oggetti che si muovano a velocità vicine a quella della luce. Per esempio, ad una velocità di un 10 per 100 di quella della luce la massa di un oggetto è solo un 0,5 per 100 maggiore del normale, mentre ad un 90 per 100 della velocità della luce la massa sarebbe di più del doppio del normale. Quando la velocità di un oggetto si avvicina alla velocità della luce, la sua massa aumenta sempre di più rapidamente, in modo che costa sempre di più e più energia accelerare un po' più l'oggetto. In realtà non può raggiungere mai la velocità della luce, perché allora la sua massa sarebbe arrivata ad essere infinita, e per

l'equivalenza tra massa ed energia, sarebbe costata una quantità infinita di energia il mettere all'oggetto in quello stato.  Per questa ragione, qualunque oggetto normale è confinato per la relatività a muoversi sempre a velocità minori di quella della luce. Solo la luce, o altre onde che non possiedano massa intrinseca, può muoversi alla velocità della luce.

Un'altra conseguenza altrettanto notevole della relatività è il modo in cui ha rivoluzionato le nostre idee circa lo spazio e del tempo. Nella teoria di Newton, se un polso di luce è inviato di un posto ad un altro, osservatori differenti sarebbero di accordo nel tempo che durò il viaggio, poiché il tempo è un concetto assoluto, ma non sarebbero sempre di accordo nella distanza percorsa per la luce, poiché lo spazio non è un concetto assoluto. Dato che la velocità della luce è semplicemente la distanza percorsa divisa per il tempo usato, osservatori differenti misureranno velocità della luce differente. In relatività, al contrario, tutti gli osservatori devono essere di accordo nella cosa rapida che viaggia la luce. Essi continueranno, nonostante, senza essere di accordo nella distanza percorsa per la luce, per quello che essi dovranno ora anche divergere nel tempo usato. , Il tempo usato è, dopo tutto, uguale allo spazio percorso, sul quale gli osservatori non sono di accordo, diviso per la velocità della luce, sul che gli osservatori sé stanno di accordo.  In altre parole, la teoria della relatività finì con l'idea di un tempo assoluto! Ogni osservatore deve avere la sua propria misura del tempo che è quella che registrerebbe un orologio che si muove vicino ad egli, ed orologi identici muovendosi con osservatori differenti non dovrebbero coincidere.

Ogni osservatore potrebbe usare un radar per così sapere dove e quando succedè qualunque evento, mediante l'invio di un polso di luce o di onde di radio.  Parte del polso si rifletterà di giro nell'evento e l'osservatore misurerà il tempo che trascorre fino a ricevere l'eco. Si dice che il tempo dell'evento è il tempo mezzo tra l'istante di emissione del polso e quello di ricevimento dell'eco. La distanza dell'evento è uguale alla metà del tempo trascorso nel viaggio completo di dà e giro, moltiplicato per la velocità della luce. , Un evento, in questo senso, è qualcosa che ha luogo in un punto specifico dello spazio ed in un determinato istante di tempo.  Questa idea si mostra nella figura 2.1 che rappresenta un esempio di un diagramma spazio-tempo.  Usando il procedimento anteriore, osservatori in movimento relativo tra sé assegneranno tempi e posizioni differenti ad un stesso evento. Nessuna misura di qualunque osservatore particolare è più corretta di quella di qualunque altro osservatore, ma tutte sono equivalenti ed inoltre sono relazionate tra sé. Qualunque osservatore può calcolare di forma precisa la posizione ed il tempo che qualunque altro osservatore assegnerà ad un determinato processo, purché sappia la velocità relativa dell'altro osservatore.

Oggigiorno, si usa questo metodo per misurare distanze con precisione, poiché possiamo misurare con più esattezza tempi che distanzi.  In realtà, il metro si definisce come la distanza percorsa per la luce in 0,000000003335640952 secondi, misurati per

un orologio di cesio. , La ragione per la quale si sceglie questo numero in questione è perché corrisponde alla definizione storica del metro, in termini di due marche esistenti in una sbarra di platino concreta che si guarda a Parigi.  Ugualmente, possiamo usare una nuova e più conveniente unità di longitudine chiamato secondo-luce.  Questa si definisce semplicemente come la distanza che percorre la luce in un secondo.  Nella teoria della relatività, si definiscono oggigiorno le distanze in funzione di tempi e della velocità della luce, in modo che si stacca che qualunque osservatore misurerà la stessa velocità della luce, per definizione, 1 metro per 0,000000003335640952 secondi.  Non c'è necessità di introdurre l'idea di un etere il cui presenzia in qualche modo non può essere scoperta, come mostrò l'esperimento di Michelson-Morley.  La teoria della relatività ci forza, al contrario, a cambiare i nostri concetti di spazio e tempo.  Dobbiamo accettare che il tempo non è completamente separato ed indipendente dello spazio, ma al contrario si accorda con lui per formare un oggetto chiamato espaciotiempo.-

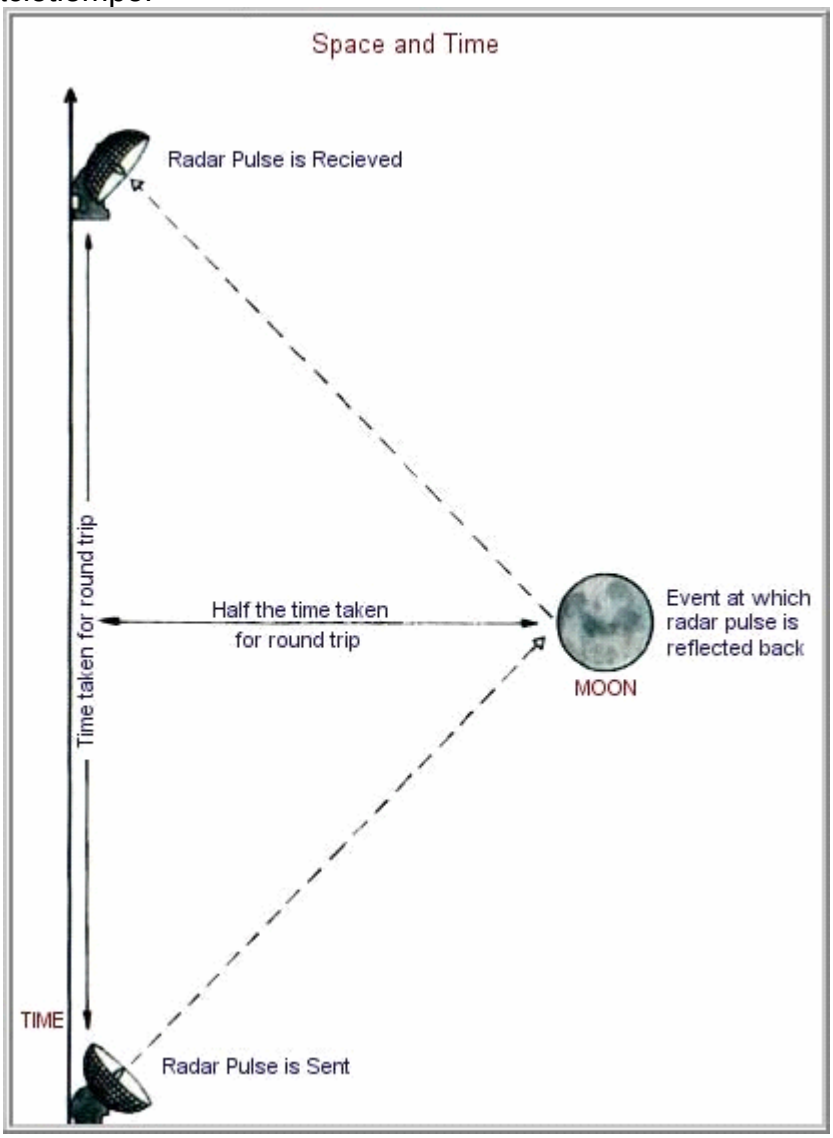


Figura 2:1: Il tempo si misura verticalmente e la distanza dall'osservatore si misura orizzontalmente. Il verso l'osservatore attraverso lo spazio e del tempo corrisponde alla linea verticale della sinistra. Le strade dei raggi di luce inviati e specchiati sono le linee diagonali

Per l'esperienza ordinaria sappiamo che può descriversi la posizione di un punto nello spazio per tre numeri o coordinate. Per esempio, uno può dire che un punto dentro una stanza sta a tre metri di una parete, ad un metro dell'altra ed ad un metro e mezzo sul suolo. o uno potrebbe specificare che un punto sta ad una certa latitudine e longitudine ed ad una certa altezza sul livello del mare. Uno ha libertà per usare qualunque insieme valido di coordinato, benché la sua utilità possa essere molto limitata. Nessuno specificherebbe la posizione della Luna in funzione dei chilometri che distò al nord e l'ovest da Piccadilly Circus e del numero di metri che stia sul livello del mare. Invece di quello, uno potrebbe descrivere la posizione della Luna in funzione della sua distanza rispetto ad al sole, rispetto al piano che trattiene alle orbite dai pianeti ed all'angolo formato tra la linea che unisce alla Luna ed al sole, e la linea che unisce al sole ed ad alcuno stella vicina, come Alfa Centauro.  Neanche queste coordinate sarebbero di gran utilità per descrivere la posizione del Sole nella nostra galassia, o quella della nostra galassia nel gruppo locale di galassie. In realtà, può descriversi l'universo intero in termini di una collezione di pezzi subdoli. In ogni pezzo, può usarsi un insieme differente di tre coordinate per specificare la posizione di qualunque punto.

Un evento è qualcosa che succede in un punto particolare dello spazio ed in un istante specifico di tempo. Per ciò, può descriversi per mezzo di quattro numeri o coordinate. L'elezione del sistema di coordinate è di nuovo arbitraria; uno può usare tre coordinate spaziali chiunque ben definite ed una misura del tempo. In relatività, non esiste una distinzione reale tra le coordinate spaziali ed il temporale, esattamente uguale a come non c'è in due nessuna differenza reale coordinate spaziali chiunque. Potrebbe scegliersi un nuovo insieme di coordinato nel che, diciamo, la prima coordinata spaziale sia una combinazione della prima e le seconde coordinate antiche. Per esempio, invece di misurare la posizione di un punto sulla Terra in chilometri al nord di Piccadilly, e chilometri all'ovest di Piccadilly, potrebbe usare chilometri al nordest Piccadilly e chilometri al nordovest di Piccadilly. Analogamente, in relatività, potrebbe usare si unisca nuova coordinata temporanea che fosse uguale alla coordinata temporanea antica, in secondi, più la distanza, in seconda luce, al nord di Piccadilly.

Spesso posto vacante utile pensare che le quattro coordinate di un evento specificano la sua posizione in un spazio cuatridimensional chiamato spazio-tempo.  È impossibile immaginare un spazio cuatridimensional. Personalmente già incontro sufficientemente difficile visualizzare lo spazio tridimensionale!  Tuttavia, posto vacante facile disegnare diagrammi di spazi bidimensionali, tali come la superficie della Terra. , La superficie terrestre è bidimensionale perché la posizione di un punto in lei può essere specificata per mezzo di due coordinate, latitudine e longitudine.  Generalmente userò diagrammi

nei quali il tempo aumenta verso l'alto ed una delle dimensioni spaziali si mostra orizzontalmente. Le altre due dimensioni spaziali sono ignorate o, a volte, una di esse si indica in prospettiva. , Questi diagrammi, come quello che appare nella figura 2.1, si chiamano di espaciotiempo.- Per esempio, nella figura 2.2 il tempo si misura verso l'alto in anni e la distanza, proiettata, durante la linea che va del Sole ad Alfa Centauro, si misura orizzontalmente in chilometri. Le strade del Sole e di Alfa Centauro, attraverso lo spazio-tempo, si rappresentano per le linee verticali alla sinistra e la destra del diagramma. Un raggio di luce del Sole segue la linea diagonali e tardi quattro anni in andare del Sole ad Alfa Centauro.

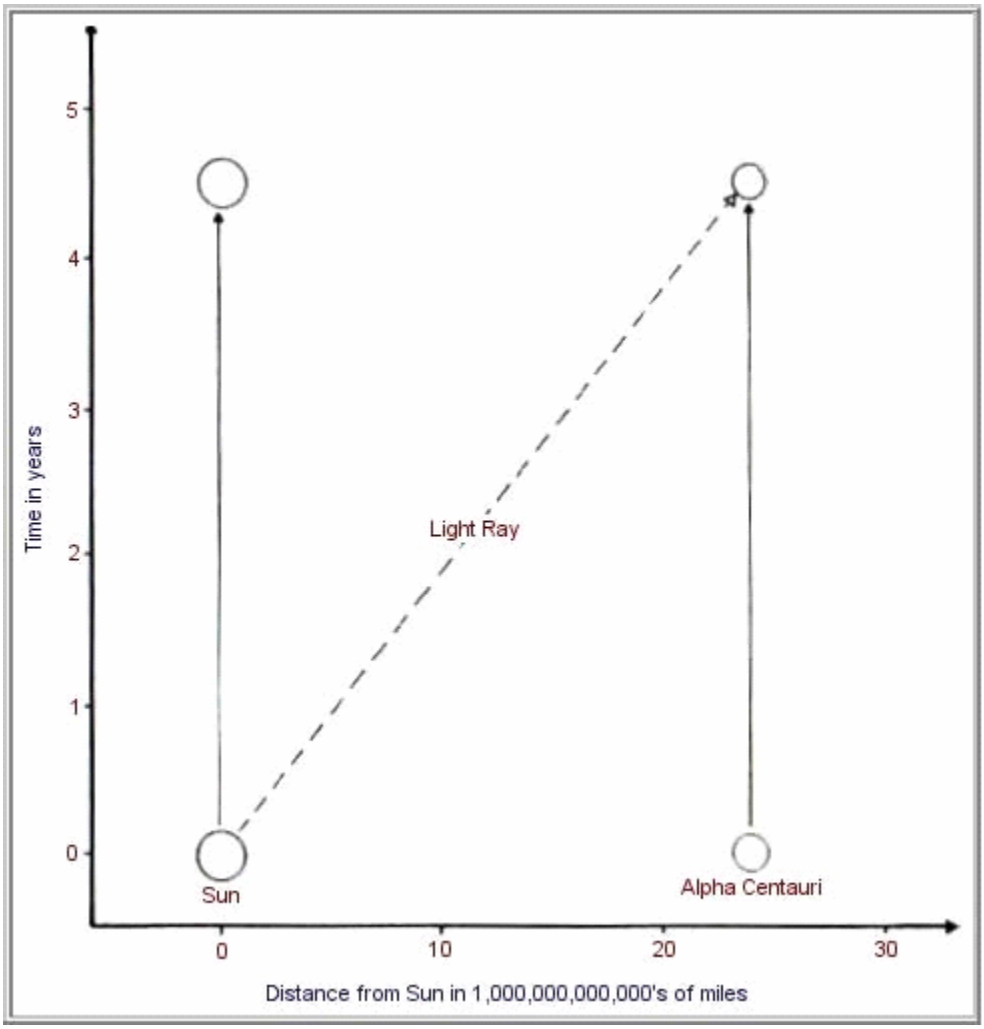



Figura 2:2

Come abbiamo visto, le equazioni di Maxwell predicevano che la velocità della luce dovrebbe essere la stessa chiunque che fosse la velocità della fonte, quello che è stato confermato per dosate molto precise. Di ciò si stacca che se un polso di luce è emesso in un istante concreto, in un punto particolare dello spazio, allora, come continua a trascorrere il tempo, si andrà estendendo come una sfera di luce il cui volume e posizione sono indipendenti della velocità della fonte. Dopo una milionesimo di

secondo la luce si sarà divertita formando una sfera con un raggio di 300 metri; dopo due milionesimo di secondo il raggio sarà di 600 metri, e così via. Sarà come le onde che si estendono sulla superficie di un stagno quando si lancia una pietra. Le onde si estendono come circoli che continuano ad aumentare di volume come uvetta il tempo. Se uno immagina un modello tridimensionale consistente nella superficie bidimensionale dello stagno e la dimensione temporanea, le onde circolari che si espandono segneranno un cono il cui vertice starà nel posto e tempo in cui la pietra battè l'acqua, figura 2.3. In maniera simile, la luce, espandendosi da un evento dato, forma un cono tridimensionale nello spazio-tempo cuatridimensional. Detto cono si conosce come il cono di luce futuro dell'evento. Della stessa forma, possiamo disegnare un altro cono, chiamato il cono di luce passato, il quale è l'insieme di eventi dal quale un polso di luce è capace di raggiungere l'evento dato, figura 2.4.

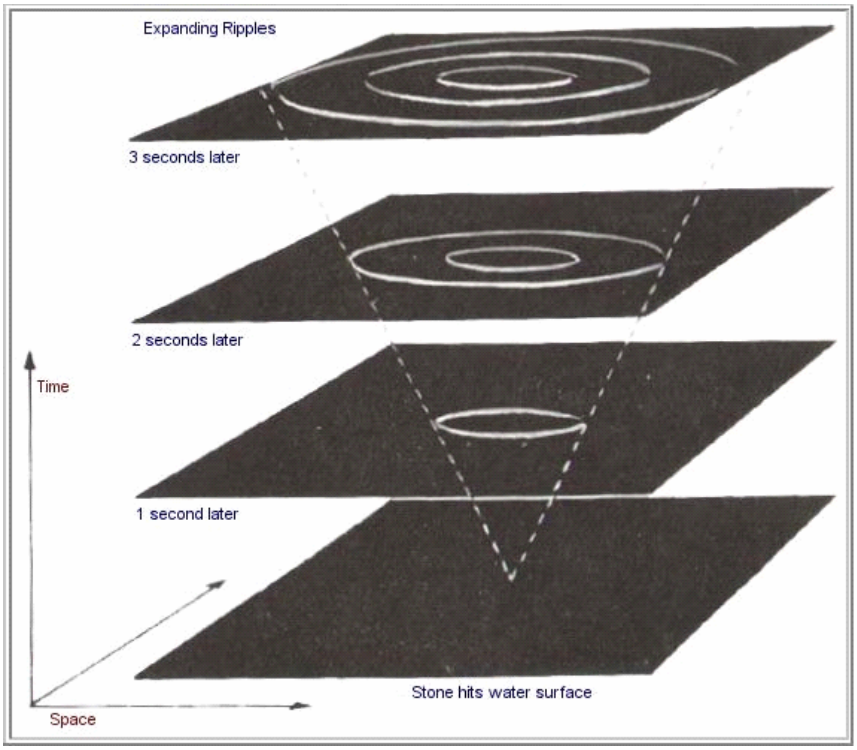
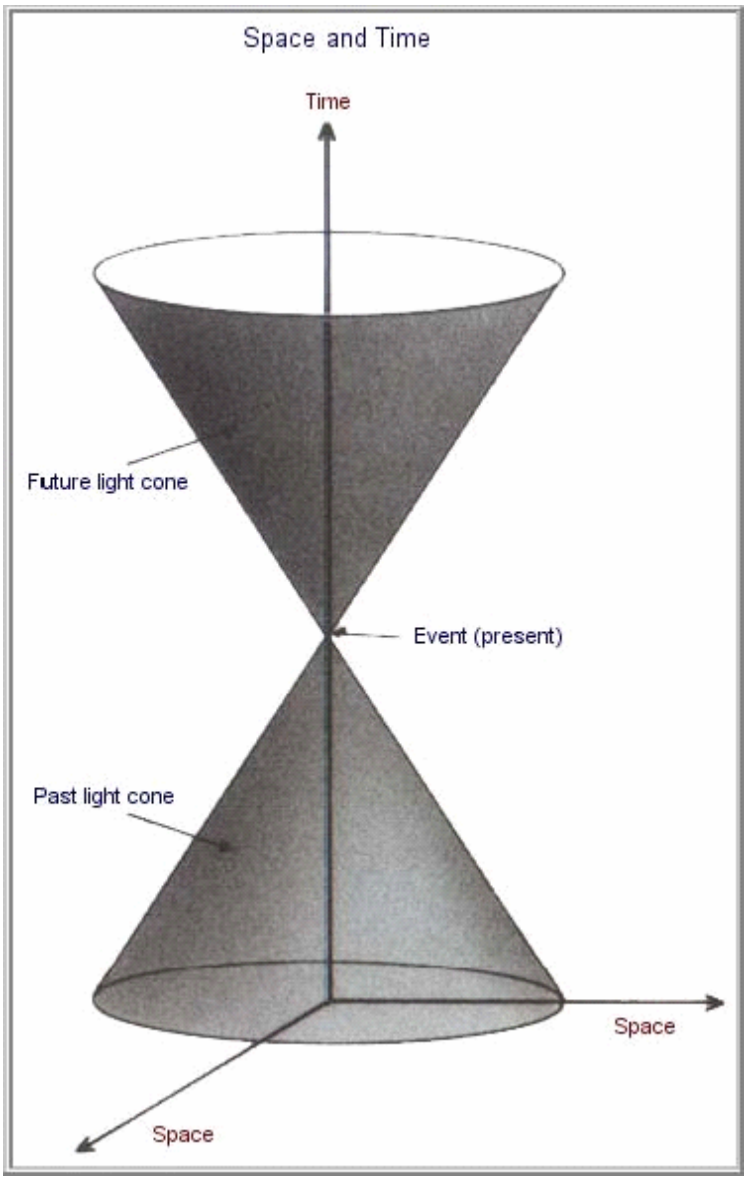



Figura 2:3 Figura 2:4




I coni di luce futuro e passato di un evento P divide allo spazio-tempo in tre regioni, figura 2.5. Il futuro assoluto dell'evento è la regione interna del cono di luce futuro di P. È l'insieme di tutti gli eventi che possono in principio essere colpiti per quello che succede in P. Sucesos fosse del cono di luce di *P non* possono essere raggiunti per segni provenienti di P, perché nessuna di esse può viaggiare più rapido della luce. Questi eventi non possono, pertanto, essere influiti per quello che succede in *P.* Il passato assoluto di P è la regione interna del cono di luce passato. È l'insieme di tutti gli eventi dai che i segni che viaggiano con velocità uguali o minori di quella della luce, possono raggiungere P. È, quindi, l'insieme di tutti gli eventi che possono colpire quello che succede in P. in un principio Se si conosce quello che succede in un istante particolare in tutti i
posti della regione dello spazio che cade dentro il cono di luce passato da P, può predirsi quello che succederà in P. Il "resto" è la regione dello spazio-tempo che è fuori

dei coni di luce futuri e passato di P. Sucesos del resto non possono né colpire né essere colpiti per eventi in P. per esempio, se il Sole cessasse di illuminare in questo stesso istante, ciò non colpirebbe le cose della Terra nel tempo presente perché starebbe nella regione del resto dell'evento corrispondente a spegnersi il Sole, figura 2.6. Sapremmo solo otto minuti dopo che è il tempo che tarda la luce a raggiungerci dal Sole. unicamente allora starebbero gli eventi della Terra nel cono di luce futuro dell'evento nel quale il Sole si spense. Di modo simile, non sappiamo che cosa sta succedendo lontano da noi nell'universo, in questo istante: la luce che vediamo delle galassie distanti partì di esse fa milioni di anni, e nel caso degli oggetti più distanti osservati, la luce partì fa circa otto mille milioni di anni. Così, quando guardiamo all'universo, lo vediamo come fu nel passato.

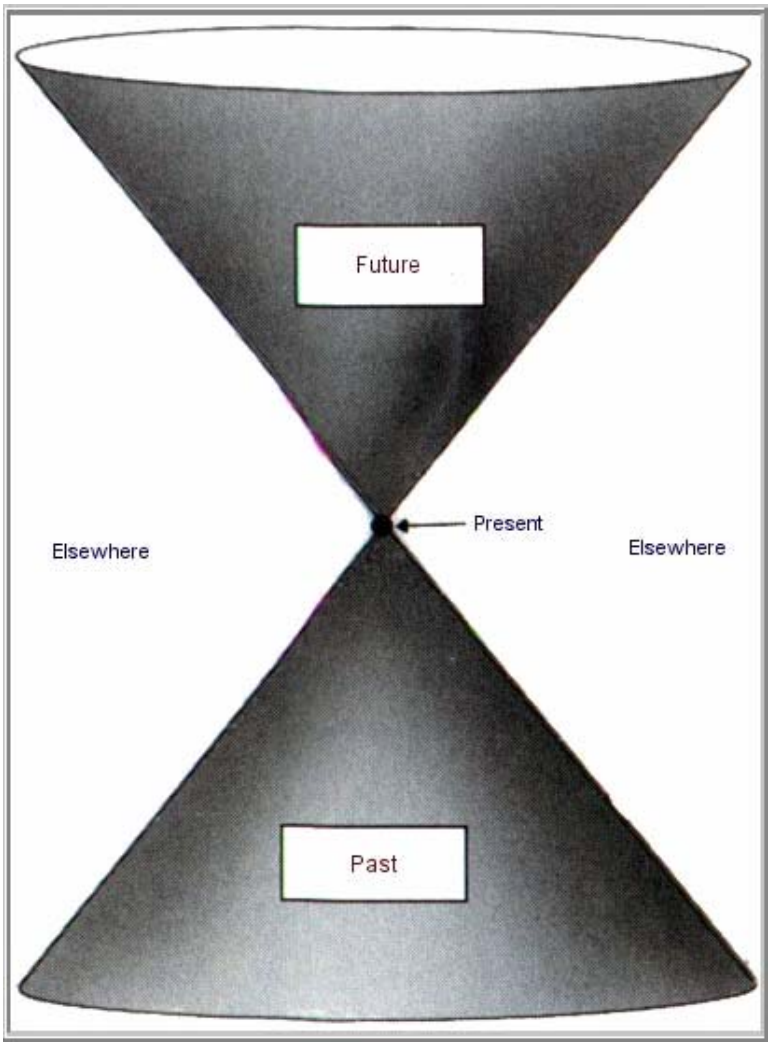
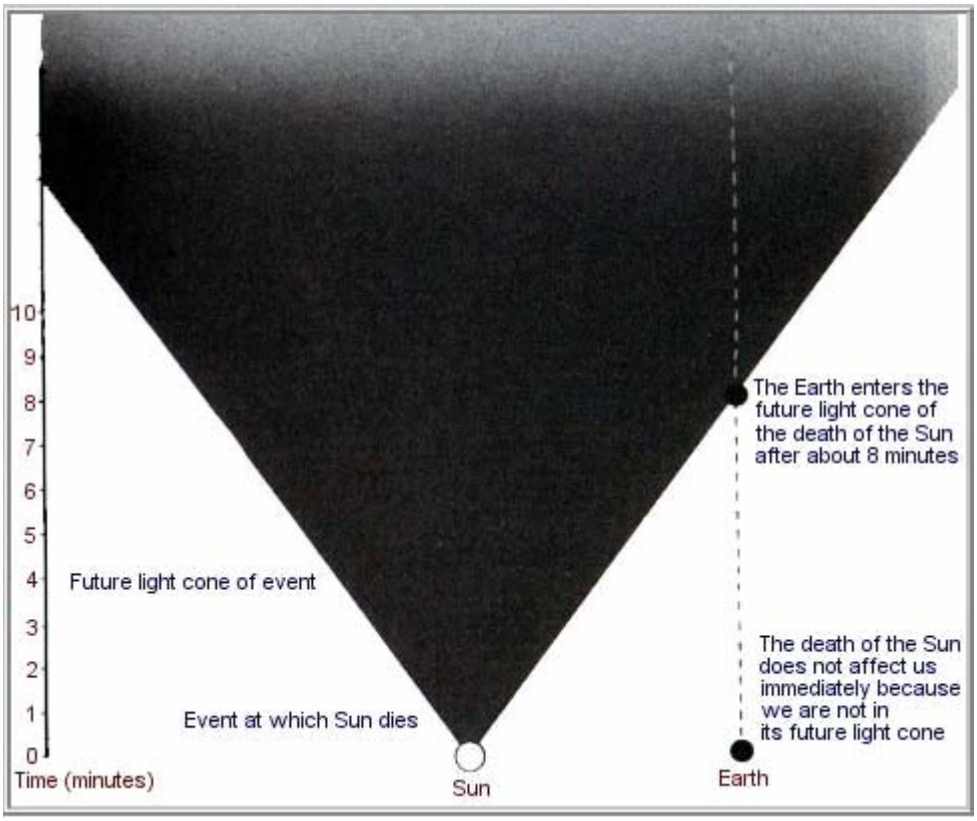



Figura 2:5 Figura 2:6




Se si ignorano gli effetti gravitazionali, tale e come Einstein e Poincaré fecero in 1905, uno ha quello che si chiama la teoria della relatività speciale. Per ogni evento nello spazio-tempo può costruirsi un cono di luce, l'insieme di tutte le possibili strade luminose nello spazio-tempo emessi in quell'evento, e dato che la velocità della luce è la stessa per ogni evento ed in ogni direzione, tutti i coni di luce saranno identici e saranno orientati in 1 a stessa direzione. Anche la teoria ci dice che niente può viaggiare più rapido della velocità della luce. Questo significa che quello verso qualunque oggetto attraverso lo spazio e del tempo deve essere rappresentato per una linea che cade dentro il cono da luce di qualunque evento in lei, figura 2.7.

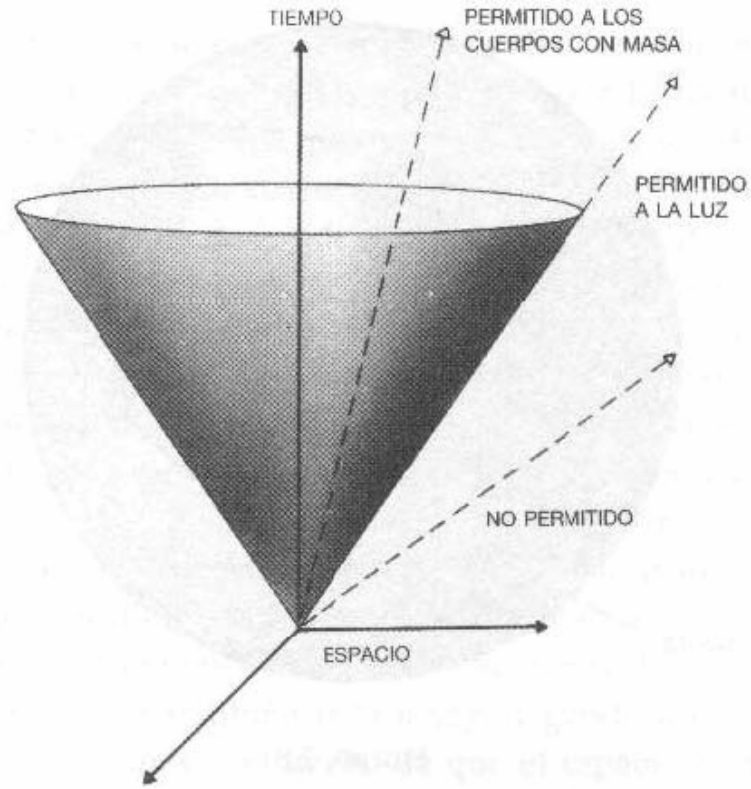



FIGURA 2.7

La teoria della relatività speciale ebbe un gran successo spiegando perché la velocità della luce era la stessa per tutti gli osservatori, tale e come aveva mostrato l'esperimento di Michelson-Morley, e descrivendo adeguatamente quello che succede quando gli oggetti si muovono con velocità vicine a quella della luce. Tuttavia, la teoria era inconsistente con la teoria della gravitazione di Newton che diceva che gli oggetti si accattivavano mutuamente con una forza dipendente della distanza tra essi. Questo significava che se uno muoveva uno degli oggetti, la forza sull'altro cambierebbe istantaneamente. o in altre parole, gli effetti gravitazionali dovrebbero viaggiare con velocità infinita, invece di con una velocità uguale o minore di quella della luce, come la teoria della relatività speciale richiedeva. Einstein realizzò tra 1908 e 1914 vari tentativi, senza successo, per trovare una teoria della gravità che fosse consistente con la relatività speciale. Finalmente, in 1915, propose quello che oggigiorno si conosce come teoria della relatività generale.

Einstein fece il suggerimento rivoluzionario che la gravità non è una forza come le altre, ma è una conseguenza che lo spazio-tempo non sia piano, come previamente si era supposto: lo spazio-tempo è ricurvo, o "deformato", per la distribuzione di massa

ed energia in lui presenti. I corpi come la Terra non stanno forzati a muoversi in orbite curve per una forza chiamata gravità; invece di questo, essi seguono la traiettoria più simile ad una linea retta in un spazio curvo, cioè, quello che si conosce come un geodesico. Un geodesico è la strada più breve, o più molto, in due punti vicini. Per esempio, la superficie della Terra è un spazio curvo bidimensionale. Le geodesice nella Terra si chiamano circoli massimi, e sono in due la strada più breve punti, figura 2.8. Come la geodesica è in due la strada più breve aeroporti chiunque, il navigatore di linee aeree dirà al pilota che voli durante lei. In relatività generale, i corpi seguono sempre linee rette nello spazio-tempo cuatridimensional; tuttavia, ci sembra che si muovano durante traiettorie ricurve nel nostro spazio tridimensionale. , Questo è come vedere ad un aeroplano volando su un terreno montagnoso.  Benché segua una linea retta nello spazio tridimensionale, la sua ombra seguirà una strada curva nel suolo bidimensionale.

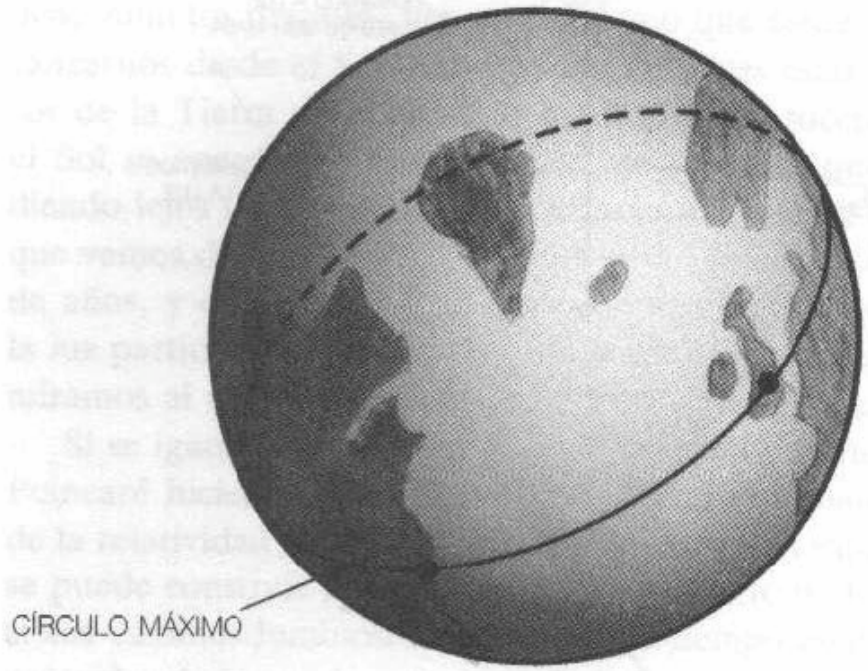



FIGURA 2.8

La massa del Sole curva lo spazio-tempo di tale modo che, malgrado la Terra segua una strada retta nello spazio-tempo cuatridimensional, ci sembra che si muova in un'orbita circolare nello spazio tridimensionale. In realtà, le orbite dei pianeti predichas per la relatività generale sono quasi esattamente le stesse che le predichas per la teoria della gravità newtoniana.  Tuttavia, nel caso di Mercurio che all'essere il pianeta più vicino al sole soffre gli effetti gravitazionali più forti e che, inoltre, ha un'orbita abbastanza allungata, la relatività generale predice che l'asse maggiore della sua ellisse dovrebbe ruotare attorno al Sole ad un ritmo di un grado per ogni diecimila anni.

Nonostante la cosa piccola di questo effetto, era stato già osservato prima di 1915 e servì come una delle prime conferme della teoria di Einstein.  Negli ultimi anni, perfino le deviazioni minori delle orbite degli altri pianeti rispetto alle predizioni newtonianas sono state misurate per mezzo del radar, trovandosi che concordano con le predizioni della relatività generale.

Anche i raggi di luce devono seguire geodesici nello spazio-tempo.  Di nuovo, il fatto che lo spazio-tempo sia curvo significa che la luce non sembra oramai viaggiare in linee rette nello spazio. Così, la relatività generale predice che la luce dovrebbe essere deviata per i campi gravitazionali.  Per esempio, la teoria predice che i coni di luce di punti vicini al sole staranno torti in dentro, dovuto alla presenza della massa del Sole. Questo vuole dire che la luce di una stella distante che passi vicino al Sole, sarà derivata un piccolo angolo, col quale la stella sembrerà stare, per un osservatore nella Terra, in una posizione differente a quello nel quale sta in realtà, figura 2.9. Naturalmente, se la luce della stella passasse sempre vicino al Sole, non saremmo capaci di distinguere se la luce era deviata sistematicamente, o se, al contrario, la stella stava realmente nella posizione dove la vediamo. Tuttavia, dato che la Terra gira attorno al Sole, differenti stelle sembrano passare di dietro del Sole e la sua luce è derivata.  Cambiano, perciò, la sua posizione apparente rispetto ad altre stelle.

Normalmente è molto difficile apprezzare questo effetto, perché la luce del Sole fa impossibile osservare le stelle che appaiono nel cielo vicine a lui.  Tuttavia, è possibile osservarlo per un'eclissi solare, nel quale la Luna si intromette tra la luce del Sole e la Terra. Le predizioni di Einstein sulle deviazioni della luce non poterono essere comprovate immediatamente, in 1915, a causa della prima guerra mondiale, e non fu possibile farlo fino a 1919 in cui una spedizione britannica, osservando un'eclissi dall'Africa orientale, dimostrò che la luce era davvero derivata per il Sole, giostro la teoria come prediceva. Questo accertamento di una teoria tedesca per scienziati britannici fu riconosciuta come un gran atto di riconciliazione tra i due paesi dopo la guerra. Risulta ironico che un esame posteriore delle fotografie prese per quella spedizione mostrasse che gli errori commessi erano tanto grandi come l'effetto che si trattava di misurare. Le sue misure erano state o un caso di fortuna, o un caso di conoscenza del risultato che si voleva ottenere, quello che succede con relativa frequenza nella scienza. La deviazione della luce è stata, nonostante, confermata con precisione per numerose osservazioni posteriori.

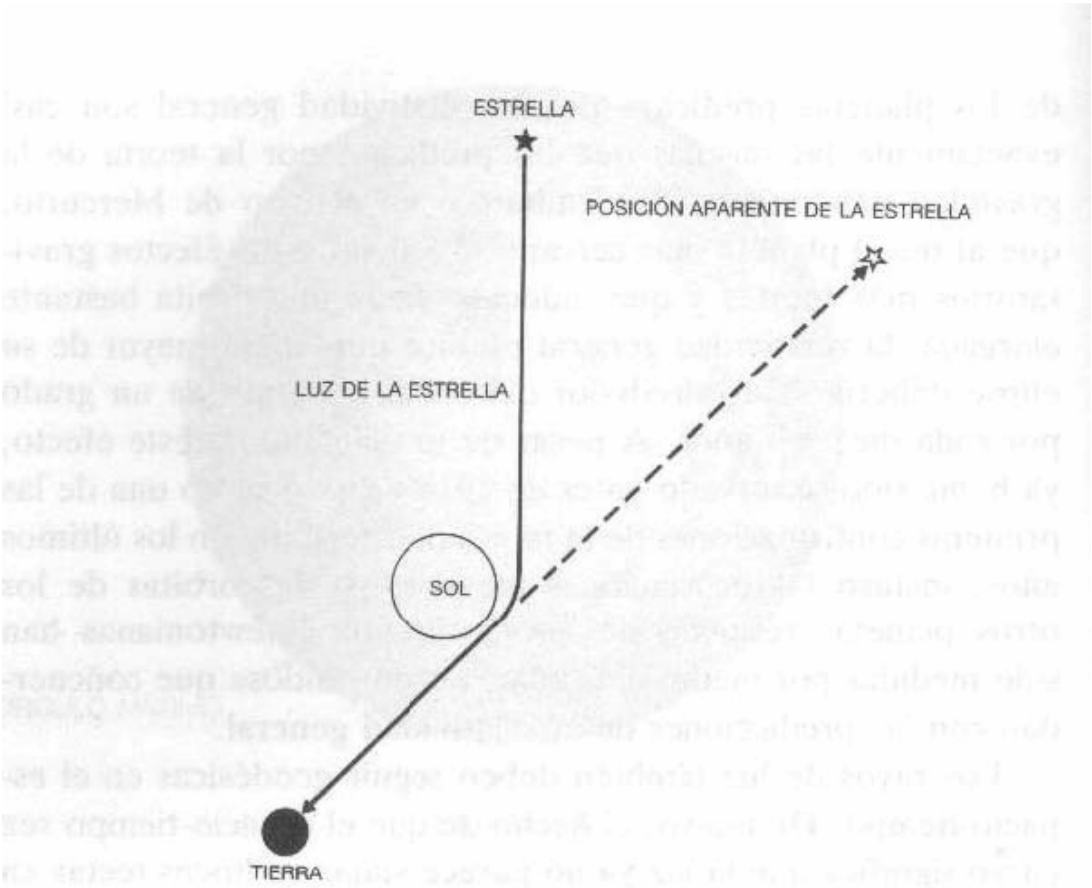



FIGURA 2.9

Un'altra predizione della relatività generale è che il tempo dovrebbe trascorrere più lentamente vicino ad un corpo di gran massa come la Terra. Ciò si deve a che c'è una relazione tra l'energia della luce e la sua frequenza, cioè, il numero di onde di luce per secondo,: quanto maggiore è l'energia, maggiore è la frequenza. Quando la luce viaggia verso l'alto nel campo gravitazionale terrestre, perde energia e, pertanto, la sua frequenza diminuisce. , Questo significa che il periodo di tempo tra una cresta dell'onda ed il seguente aumenta. A qualcuno situato sopra gli sembrerebbe che tutto quello che passasse sotto, nella Terra, trascorresse più lentamente. Questa predizione fu comprovata in 1962, usandosi un paio di orologi molto precisi installati nella parte superiore ed inferiore un deposito di acqua. Si trovò che quello di sotto che stava più vicino alla Terra, andava più lento, di accordo esattamente con la relatività generale. La differenza tra orologi a differenti altezze della Terra è, oggigiorno, di considerabile importanza pratica dovuto all'uso di sistemi di navigazione molto precisi, basati in segni provenienti di satelliti. Se Lei
ignorassero le predizioni della relatività generale, la posizione che uno calcolerebbe avrei un errore di vari chilometri!

Le leggi di Newton del movimento finirono con l'idea di una posizione assoluta nello spazio. La teoria della relatività elimina il concetto di un tempo assoluto.  Consideriamo un paio di gemelli. Supponiamo che uno di essi vive alla cima di una montagna, mentre l'altro rimane al livello del mare. Il primo gemello invecchierà più rapidamente che il secondo. Così, se tornassero a trovarsi, uno sarebbe più vecchio dell'altro. In questo caso, la differenza di età seria molto piccola, ma sarebbe molto maggiore se uno dei gemelli facesse un viaggio in un'imbarcazione spaziale ad una velocità vicina a quella della luce. Quando ritornasse, sarebbe molto più giovane di quello che rimase nella Terra. Questo si conosce come il paradosso dei gemelli, ma è solo un paradosso se uno ha sempre messa nella testa l'idea di un tempo assoluto. Nella teoria della relatività non esiste un tempo assoluto unico, ma ogni individuo possiede suo propria dosata personale del tempo, da dove misura che dipende sta e di come si muove.

Prima di 1915, si pensava allo spazio e nel tempo come se si commerciasse di una cornice fissa nella quale gli avvenimenti avevano posto, ma che non stava affettato per quello che succedesse in lui. Questo era certo incluso nella teoria della relatività speciale. I corpi si muovevano, le forze attraevano e respingevano, ma semplicemente il tempo e lo spazio continuavano, senza essere colpiti per niente. Era naturale pensare che lo spazio ed il tempo erano esistiti da sempre.

La situazione è, tuttavia, completamente differente nella teoria della relatività generale. In ella, lo spazio ed il tempo sono quantità dinamiche: quando un corpo si muove, o una forza agisce, colpisce la curvatura dello spazio e del tempo, e, in contropartita, la struttura dello spazio-tempo colpisce il modo in cui i corpi si muovono e le forze agiscono. Lo spazio ed il tempo non colpiscono solo, ma sono anche colpiti per tutto quello che succede nell'universo. Così come non si può parlare circa i fenomeni dell'universo senza le nozioni di spazio e tempo, in relatività generale non ha senso parlare dello spazio e del tempo fosse dei limiti dell'universo.

Nelle decadi seguenti alla scoperta della relatività generale, questi nuovi concetti di spazio e tempo andavano a rivoluzionare la nostra immagine dell'universo. La vecchia idea di un universo essenzialmente inalterabile che sarebbe potuto esistere, e che potrebbe continuare esistendo per sempre, fu rimpiazzata per il concetto di un universo dinamico, in espansione, che sembrava avere cominciato fa un certo tempo finito, e che potrebbe finire in una volta finito nel futuro.  Quella rivoluzione è l'oggetto del seguente capitolo. Ed anni dopo avere avuto luogo, sarebbe anche il punto di avviamento del mio lavoro in fisica teorica. Roger Penrose ed io mostriamo come la teoria della relatività generale di Einstein implicava che l'universo doveva avere un principio e, possibilmente, un fine.

# Capitolo 3

## L'UNIVERSO IN ESPANSIONE

Se si guarda il cielo in una chiara notte senza luna, gli oggetti più brillanti di uno vedi sono i pianeti Venere, Marte, Giove e Saturno. Si vede anche un gran numero di stelle che sono come il nostro Sole, ma situate a molta più distanza di noi. Alcune di queste stelle chiamate fisse cambiano, in realtà, molto leggermente le sue posizioni rispetto alle altre stelle, quando la Terra gira attorno al Sole: ma non stanno fissi in assoluto! Questo si deve a che stanno relativamente vicino a noi. Come la Terra gira attorno al Sole, li vediamo da differenti posizioni di fronte al fondo delle stelle più distanti. Si tratta di un fatto fortunato, perché ci permette di misurare la distanza tra queste stelle e noi: quanto più vicino stiano, più sembreranno muoversi.

La stella più vicina, chiamata Prossimo Centauri, si trova a quattro anni luce di noi, la luce proveniente di lei tarda circa quattro anni in arrivare alla Terra, o a circa trenta sette miliardi di chilometri. La maggior parte del resto delle stelle osservabili si trovano a prima vista a pochi cientos di anni luce di noi. Per captare la grandezza di queste distanze, diciamo che il nostro Sole sta solo ad otto minuto-luce di distanza!  Le stelle ci sono apparsi sparse per tutto il cielo notturno, benché appaiano particolarmente concentrate in una banda che chiamiamo la Via lattea. Già in 1750, alcuni astronomi incominciarono a suggerire che l'apparizione della Via lattea potrebbe essere spiegata per il fatto che la maggior parte delle stelle visibili stesse in un'unica configurazione con forma di disco, un esempio di quello che oggigiorno chiamiamo una galassia spirale. Solo alcune decadi dopo, l'astronomo sir William Herschel confermò questa idea attraverso un'ardua catalogazione delle posizioni e le distanze di un gran numero di stelle. Nonostante ciò, l'idea arrivò solo a guadagnare un'accettazione completa agli inizi del nostro secolo.

L'immagine moderna dell'universo sale solamente a 1924, quando l'astronomo nordamericano Edwin Hubble dimostrò che la nostra galassia non era l'unica. C'erano in realtà molti altre, con ampie regioni di spazio vuoto tra esse.  Per potere provare questo, doveva determinare le distanze che c'erano fino a quelle galassie, tanto lontane che, al contrario di quello che succede con le stelle vicine, sembravano essere davvero fisse. Hubble si vide forzato, pertanto, ad usare metodi indiretti per misurare quelle distanze. Risulta che la lucentezza apparente di una stella dipende da due fattori: la quantità di luce che irradia, la sua luminosità, ed egli lontano che sta di noi. Per le stelle vicine, possiamo misurare le sue lucentezze apparenti e le sue distanze, di tale forma che possiamo calcolare le sue luminosità. Inversamente, se conoscessimo la luminosità delle stelle di altre galassie, potremmo calcolare le sue distanze misurando le sue lucentezze apparenti. Hubble notò che certi tipi di stelle,

quando stanno sufficientemente il vicino a noi come affinché possa misurarsi la sua luminosità, hanno sempre la stessa luminosità. Quindi, egli argomentò che se trovassimo tali tipi di stelle in un'altra galassia, potremmo supporre che avrebbero la stessa luminosità e calcolare, di questa maniera, la distanza a quella galassia. Se potessimo fare questo per diverse stelle nella stessa galassia, ed i nostri calcoli producessero sempre lo stesso risultato, potremmo essere abbastanza sicuri della nostra stima.

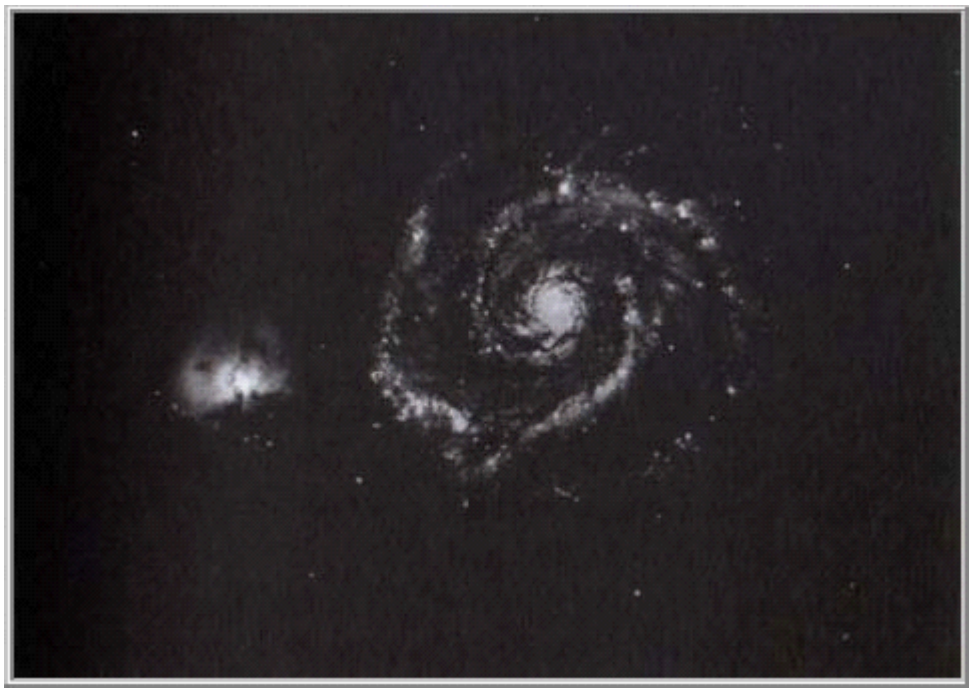


Figura 3:1

Edwin Hubble calcolò le distanze a nove galassie differenti per mezze del metodo anteriore. Attualmente sappiamo che la nostra galassia è solo una di tra i vari cientos di migliaia di milioni di galassie che possono verta coi moderni telescopi, e che ognuna di esse contiene cientos di migliaia di milioni di stelle. La figura 3.1 mostra una fotografia di una galassia spirale. Crediamo che questa immagine è simile a quella della nostra galassia se fosse veda per qualcuno che vivesse in un'altra galassia. Viviamo in una galassia che ha un diametro approssimato di cento mille anni luce, e che sta girando lentamente. Le stelle nelle braccia della spirale girano attorno al centro con un periodo di vario cientos di milioni di anni.
Il nostro Sole non è più che una stella gialla ordinaria, di volume mezzo, situata vicino al centro di uno delle braccia della spirale. Certamente, abbiamo percorso una lunga strada dai tempi di Aristotele e Tolomeo, quando credevamo che la Terra era il centro dell'universo!

Le stelle stanno tanto lontano dalla Terra che ci sembrano semplici punti luminosi. Non possiamo apprezzare né il suo volume né la sua forma. Come allora possiamo classificare alle stelle in distinti tipi? Dell'immensa maggioranza delle stelle, possiamo misurare solo una proprietà caratteristica: il colore della sua luce. Newton scoprì che quando la luce attraversa un pezzo di vetro triangolare, quello che si conosce come un prisma, la luce si divide nei diversi colori che la compongono, il suo spettro, come succede con l'arcobaleno. Mettendo a fuoco con un telescopio una stella o galassia particolare, possiamo osservare di modo simile lo spettro della luce proveniente di quella stella o galassia. Stelle differenti possiedono spettri differenti, ma la lucentezza relativa dei distinti colori è sempre esattamente uguale al che si spererebbe di trovare nella luce emessa per un oggetto in rossa incandescenza. , In realtà, la luce emessa per un oggetto opaco incandescente ha un aspetto caratteristico che dipende solo dalla sua temperatura, quello che si conosce come spettro termico. Questo significa che possiamo verificare la temperatura di una stella a partire dal suo spettro luminoso. Inoltre, si osserva che certi colori molto specifici sono assenti degli spettri delle stelle, e che questi colori assenti possono variare di una stella ad un'altra. Dato che sappiamo che ogni elemento chimico assorbe un insieme caratteristico di colori molto specifici, può determinarsi esattamente che elementi c'è nell'atmosfera di una stella paragonando gli insiemi di colori assente di ogni elemento con lo spettro della stella.

Quando gli astronomi incominciarono a studiare, negli anni venti, gli spettri delle stelle di altre galassie, trovarono tremendamente un fatto peculiare: queste stelle possedevano gli stessi insiemi caratteristici di colori assente che le stelle della nostra propria galassia, ma spaesati tutti essi nella stessa quantità relativa verso l'estremo dello spettro corrispondente al colore rosso. Per capire le applicazioni di questa scoperta, dobbiamo conoscere in primo luogo l'effetto Doppler. Come abbiamo visto, la luce visibile consiste in fluttuazioni od onde del campo elettromagnetico. La frequenza, o numero di onde per secondo, della luce è eccessivamente alto, scopando da quattrocento fino a settecento milioni di onde per secondo. Le differenti frequenze della luce sono quelle che l'occhio umano vede come differenti colori, corrispondendo le frequenze più basse all'estremo rosso dello spettro e le più alte, all'estremo azzurro. Immaginiamo allora una fonte luminosa, come una stella, ad una distanza fissa di noi che emette onde di luce con una frequenza costante.  Ovviamente la frequenza delle onde che riceviamo sarà la stessa che la frequenza con la quale sono emesse, il campo gravitazionale della galassia non sarà il sufficientemente grande come per avere un effetto significativo.  Supponiamo ora che la fonte incomincia a muoversi verso noi. Ogni volta che la fonte emetta la seguente cresta di onda, starà più vicino a noi, per quello che il tempo che ogni nuova cresta tardi a raggiungerci sarà minore di quando la stella era stazionaria.  Questo significa che il tempo tra ogni due creste che noi arrivano è più breve che prima e, pertanto, che il numero di onde che riceviamo per secondo, cioè, la frequenza, è maggiore che quando la stella era stazionaria. Ugualmente, se la fonte si allontana da noi, la frequenza delle onde che riceviamo sarà

minore di nell'ipotesi stazionaria. Perciò, nel caso della luce, questo significa che le stelle che si stiano allontanando da noi avranno i suoi spettri spaesati verso l'estremo rosso dello spettro, spostamento verso il rosso, e le stelle che si stiano avvicinando avranno spettri con un spostamento verso l'azzurro. Questa relazione tra frequenza e velocità che si conosce come effetto Doppler, è un'esperienza giornaliera. Se ascoltiamo un'automobile passando per la strada notiamo che, quando c'è avvicinato, il suo motore suona con un tono più acuto della cosa normale, quello che corrisponde ad una frequenza più alta delle onde sonore, mentre quando si allontana produce un suono più grave. Il comportamento della luce o delle onde di radio è simile. In realtà, la polizia fa uso dell'effetto Doppler per misurare la velocità delle automobili a partire dalla frequenza dei polsi di onde di radio riflessi per i veicoli.

Negli anni che seguirono alla scoperta dell'esistenza di altre galassie, Hubble dedicò il suo tempo a catalogare le distanze ed ad osservare gli spettri delle galassie. In quell'epoca, la maggior parte della gente pensava che le galassie si muoverebbero di forma abbastanza aleatorio, per quello che si sperava di trovare tanti spettri con spostamento verso l'azzurro come verso il rosso. Fu una sorpresa assoluta, pertanto, trovare che la maggioranza delle galassie presentavano un spostamento verso il rosso: tutte si stavano allontanando quasi da noi! Perfino più sorprendente fu ancora il ritrovamento che Hubble pubblicò in 1929: neanche lo spostamento delle galassie verso il rosso è aleatorio, ma è direttamente proporzionale alla distanza che ci separa da esse. o, detto con altre parole, quanto più lontano sta' una galassia, a maggiore velocità ti allontani da noi! Questo significa che l'universo non può essere statico, come tutto il mondo aveva creduto prima, ma in realtà si sta espandendo. La distanza tra le differenti galassie sta aumentando continuamente.

La scoperta che l'universo si sta espandendo è stato uno dei grandi rivoluzioni intellettuali del secolo xx. Visto *a posteriori,* è naturale meravigliarsi che a nessuno gli fosse stato successo questo prima. Newton, e qualche altro scienziato, avrebbe dovuto dare conta che un universo statico incomincerebbe subito a contrarsisi sotto l'influenza della gravità. Ma supponiamo che, al contrario, l'universo si espande. Se si stesse espandendo molto lentamente, la forza della gravità frenerebbe finalmente l'espansione e quello comincerebbe allora a contrarsisi. Tuttavia, se si espandesse più in fretta che ad un certo valore critico, la gravità non sarebbe mai la sufficientemente intensa come per fermare l'espansione, e l'universo continuerebbe espandendosi per sempre. La situazione sarebbe simile a quello che succede quando si lancia un razzo verso lo spazio dalla superficie della Terra. Se questo ha una velocità relativamente bassa, la gravità finirà per fermare il razzo che allora cadrà di nuovo alla Terra. Al contrario, se il razzo possiede una velocità maggiore che una certa velocità critica, di circa undici chilometri per secondo, la gravità non sarà la sufficientemente intensa come per farlo ritornare di tale forma che si manterrà allontanandosi dalla Terra per sempre. Questo comportamento dell'universo sarebbe potuto essere predetto a partire

dalla teoria della gravità di Newton, nel secolo xix, nel xviii, o perfino alla fine del xvii. La credenza in un universo statico era tanto forte che persistè fino a principi del secolo xx. Perfino Einstein, quando in 1915 formulò la teoria della relatività generale, era tanto sicuro che l'universo doveva essere statico che modificò la teoria per fare che ciò fosse possibile, introducendo nelle sue equazioni la chiamata costante cosmologica. Einstein introdusse una nuova forza "antigravitatoria" che, al contrario che le altre forze, non proveniva da nessuna fonte in questione, ma stava inserisce nella struttura stessa dell'espaciotiempo.- Egli sosteneva che lo spazio-tempo aveva una tendenza intrinseca ad espandersi, - e che questa avrebbe un valore che equilibrerebbe esattamente l'attrazione di tutta la materia nell'universo, in modo che sarebbe possibile l'esistenza di un universo statico. Solo un uomo era disposto, come sembra, ad accettare alla lettera la relatività generale. Così, mentre Einstein ed altri fisici cercavano modi di evitare le predizioni della relatività generale di un universo non statico, il fisico e matematico russo Alexander Friedmann si disporsi, al contrario, a spiegarli.

Friedmann fece due supposizioni molto semplici sull'universo: che l'universo sembra lo stesso da qualunque direzione dalla quale lo sia osservato, e che anche ciò sarebbe certo se lo fossi osservato da qualunque altro posto. A partire da questi due idei unicamente, Friedmann dimostrò che non dovrebbe sperarsi che l'universo fosse statico. In realtà, in 1922, vari anni prima della scoperta di Edwin Hubble, Friedmann predisse esattamente quello che Hubble trovò!

La supposizione che l'universo sembra lo stesso in tutte direzioni, non è certo nella realtà. Per esempio, come abbiamo visto, le altre stelle della nostra galassia formano un'inconfondibile banda di luce durante il cielo, chiamata Via lattea. Ma se ci concentriamo sulle galassie lontane, sembra c'essere più o meno lo stesso numero di esse in ogni direzione. Così, l'universo sembra essere approssimativamente lo *stesso* in qualunque direzione, purché sia analizzato a gran scala, comparata con la distanza tra galassie, e si ignorino le differenze a piccola scala. Per molto tempo, questa fu giustificazione sufficiente per la supposizione di Friedmann, presa come un avvicinamento grossolano del mondo reale. Ma recentemente, un fortunato incidente rivelò che la supposizione di Friedmann è in realtà una descrizione straordinariamente esatta del nostro universo.

In 1965, due fisici nordamericani dei laboratori della Bell Telephone in Nuovo Jersey, Arno Penzias e Robert Wilson, stavano provando un rivelatore di microonde eccessivamente sensibile, (Le microonde sono uguali alle onde luminose, ma con una frequenza dell'ordine di solo diecimila milioni di onde per secondo. Penzias e Wilson si sorpresero il trovare che il suo rivelatore captava più rumore del che speravano. Il rumore non sembrava provenire da nessuna direzione in questione. Al principio scoprirono escrementi di uccello nel suo rivelatore**,** per quello che comprovarono tutti i

possibili difetti di funzionamento, ma pronto li rifiutarono. Essi sapevano che qualunque rumore proveniente di dentro l'atmosfera sarebbe meno intenso quando il rivelatore fosse diretto verso l'alto che quando non lo stesse, poiché i raggi luminosi attrarrebbero molta più atmosfera quando si ricevessero da vicino all'orizzonte che quando si ricevessero direttamente da sopra. Il rumore extra era lo stesso per qualunque direzione dalla quale si osservasse, in modo che doveva provenire di *fosse dell'atmosfera.* Il rumore era anche lo stesso durante il giorno, e durante la notte, e durante tutto l'anno, malgrado la Terra girasse sul suo asse ed attorno al Sole. Questo dimostrò che la radiazione doveva provenire di oltre il sistema solare, e perfino da oltre la nostra galassia, perché altrimenti varierebbe quando il movimento della Terra facesse che il rivelatore segnasse in differenti direzioni. In realtà, sappiamo che la radiazione ha dovuto viaggiare fino a noi attraverso la maggior parte dell'universo osservabile, e dato che sembra essere la stessa in tutte le direzioni, l'universo deve essere anche lo stesso in tutte le direzioni, per lo meno a gran scala. Attualmente, sappiamo che in qualunque direzione che guardiamo, il rumore non varia mai più di una parte in diecimila. Così, Penzias e Wilson si imbatterono inconsciamente in una conferma straordinariamente precisa della prima supposizione di Friedmann.

Approssimativamente contemporaneamente, due fisici nordamericani della vicina Università di Princeton, Guidoslitta anche Dicke e Jim Peebles, erano interessati nelle microonde. Studiavano un suggerimento fatto per George Gamow che era stato alunno di Alexander Friedmann, relativa a che l'universo nei suoi primi istanti sarebbe dovuto essere molto caldo e denso, per finire bersaglio incandescente. Dicke e Peebles argomentarono che dovremmo essere ancora capaci di vedere lo splendore degli inizi dell'universo, perché la luce proveniente di posti molto distanti starebbe raggiungendoci ora. Tuttavia, l'espansione dell'universo implicherebbe che questa luce dovrebbe essere tanto tremendamente spaesata verso il rosso che c'arriverebbe oggigiorno come radiazione di microonde. Quando Dicke e Peebles stavano studiando come cercare questa radiazione, Penzias e Wilson seppero dell'obiettivo di quello lavoro e compresero che essi avevano trovato già detta radiazione. Grazie a questo lavoro, Penzias e Wilson furono premiati col premio Nobel in 1978 (quello che sembra essere abbastanza ingiusto con Dicke e Peebles, per non menzionare a Gamow .

A prima vista, potrebbe sembrare che tutta questa evidenza che l'universo sembra lo stesso in qualunque direzione dalla quale guardiamo suggerirebbe che c'è qualcosa di speciale in quanto alla nostra posizione nell'universo. In questione, si potrebbe pensare che, se osserviamo a tutte le altre galassie allontanarsi da noi, è perché stiamo nel centro dell'universo. È, tuttavia, una spiegazione alternativa: l'universo potrebbe essere anche uguale in tutte le direzioni se l'osservassimo da qualunque altra galassia. Questo, come abbiamo visto, fu la seconda supposizione di Friedmann. Non si tiene evidenza scientifica a favore o contro questa supposizione. Crediamo in lei solo per ragioni di modestia: sarei straordinariamente curioso che l'universo

sembrasse identico in tutte le direzioni ad intorno nostro, e che non fossi così per altri punti dell'universo! Nel modello di Friedmann, tutte le galassie si stanno allontanando tra sé alcune di altre.  La situazione è simile ad un globo con un certo numero di punti disegnati in lui, e che si va gonfiando uniformemente. Come il globo si gonfia, la distanza tra ogni due punti aumenta, nonostante il quale non si può dire che esista un punto che sia il centro dell'espansione. Inoltre, quanto più lontano stiano i punti, si separeranno con maggiore velocità. Analogamente, nel modello di Friedmann la velocità col che due galassie chiunque si separano è proporzionale alla distanza tra esse.  In questo modo, prediceva che lo spostamento verso il rosso di una galassia dovrebbe essere direttamente proporzionale alla sua distanza a noi, esattamente quello che Hubble trovò. Nonostante il successo del suo modello e delle sue predizioni delle osservazioni di Hubble, il lavoro di Friedmann continuò ad essere ignorato nel mondo occidentale fino a che in 1935 il fisico nordamericano Howard Robertson ed il matematico britannico Arthur Walker crearono modelli simili in risposta alla scoperta per Hubble dell'espansione uniforme dell'universo. Benché Friedmann trovasse solo uno, esistono in realtà tre tipi di modelli che ubbidiscono alle due supposizioni fondamentali di Friedmann. Nel primo tipo (quello che trovò Friedmann,  l'universo si espande il sufficientemente lento come affinché l'attrazione gravitazionale tra le differenti galassie sia capace di frenare e finalmente fermare l'espansione. Allora le galassie si incominciano ad avvicinare le alcune alle altre e l'universo si contrarsi.  La figura 3.2 dimostrazione come cambia, come aumenta in due il tempo, la distanza galassie vicine. Questa incomincia essendo uguale a zero, aumenta fino ad arrivare ad un massimo e dopo diminuisce fino a farsi zero di nuovo. Nel secondo tipo di soluzione, l'universo si espande tanto rapidamente che l'attrazione gravitazionale non può fermarlo, benché sì che lo frena un po'. La figura 3.3 mostra in due la separazione galassie vicine in questo modello. Incomincia in zero e col tempo continua ad aumentare, perché le galassie continuano separandosi con una velocità stazionaria. Infine, esiste un terzo tipo di soluzione, nel quale l'universo si sta espandendo solo con la velocità giusta per evitare di collassare. La separazione in questo caso, mostrata nella figura 3.4, incomincia anche in zero e continua aumentando sempre. Tuttavia, la velocità con la quale le galassie si stanno separando fa sempre di più piccola, benché non arrivi mai ad essere nulla.

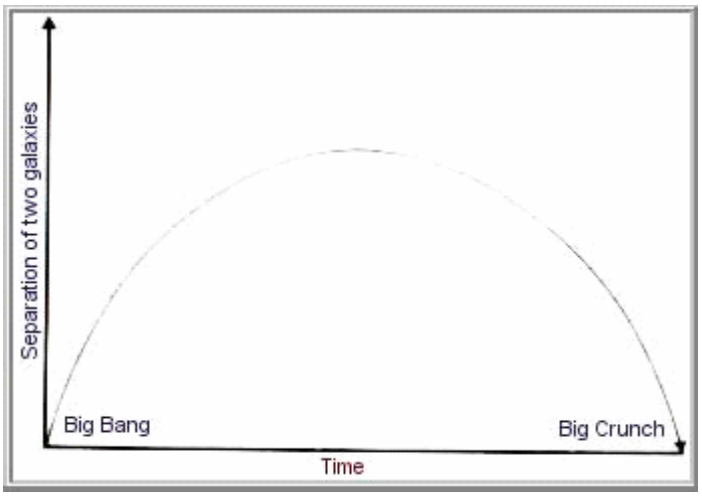


Figura 3:2

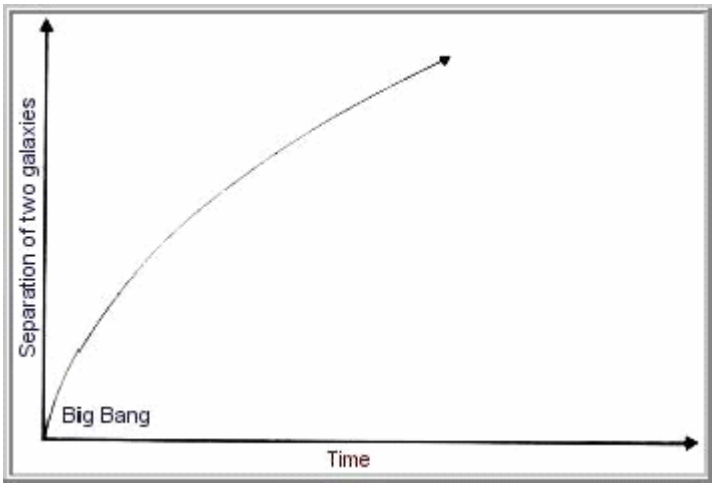
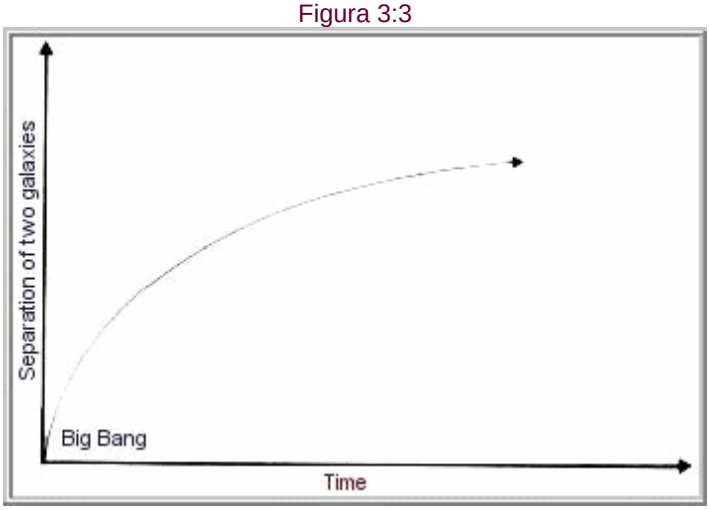


Figura 3:3



Raffiguri 3:4

Una caratteristica notevole del primo tipo di modello di Friedmann è che, in lui, l'universo non è infinito nello spazio, benché neanche abbia nessun limite. La gravità è tanto forte che lo spazio si curva chiudendosi su sé stesso, risultando simile alla superficie della Terra. Se uno si mantiene viaggiando sulla superficie della Terra in una certa direzione, non arriva mai di fronte ad una barriera insormontabile o cade per un precipizio, ma finalmente ritorna al posto di dove partì. Nel primo modello di Friedmann, lo spazio è giusto come questo, ma con tre dimensioni invece di con due, come succede con la superficie terrestre. La quarta dimensione, anche il tempo, ha un'estensione finita, ma è come una linea con due estremi o antistanti, un principio ed un fine. Si vedrà più avanti che quando si accorda la relatività generale col principio di incertezza della meccanica quantica, è possibile che ambedue, spazio e tempo, siano finiti, senza nessun tipo di bordo o frontiera.

L'idea che potrebbe andare via on-line retta attorno all'universo e finire dove si incominciò è buona per la fantascienza, ma non ha troppa rilevanza pratica, perché può verta che l'universo collasserebbe di nuovo a volume zero prima che potesse completarsi un giro intero. Uno dovrebbe viaggiare più rapido della luce, quello che è impossibile, per potere ritornare al punto di partenza prima che l'universo avesse un fine.

Nel primo tipo di modello di Friedmann, quello che si espande primo e dopo collassa, lo spazio è ricurvo su sé stesso, come la superficie della Terra. È, pertanto, finito in estensione. Nel secondo tipo di modello, quello che si espande per sempre, lo spazio sta curvato al contrario, cioè, come la superficie di una sella. Così, in questo caso lo spazio è infinito. Finalmente, nel terzo tipo, quello che possiede la velocità critica di espansione, lo spazio non è ricurvo, e, pertanto, è anche infinito.
Ma, quale dei modelli di Friedmann descrive al nostro universo? Cesserà qualche volta l'universo la sua espansione ed incomincerà a contrarsisi, o si espanderà per sempre? Per rispondere a queste questioni, dobbiamo conoscere il ritmo attuale di espansione e la densità mezza presente. Se la densità è minore di un certo valore critico, determinato per il ritmo di espansione, l'attrazione gravitazionale sarà troppo debole per potere fermare l'espansione. Se la densità è maggiore che il valore critico, la gravità fermerà l'espansione in qualche tempo futuro e farà che l'universo giri a collassare.

Possiamo determinare il ritmo attuale di espansione, misurando attraverso l'effetto Doppler le velocità alle quali le altre galassie si allontanano da noi. Questo si può impadronire di molta precisione. Tuttavia, le distanze alle altre galassie non si conoscono bene perché possiamo misurarli solo indirettamente. Così, tutto quello che sappiamo è che l'universo si espande tra un cinque ed un dieci per 100 ogni mille milioni di anni. Tuttavia, la nostra incertezza rispetto alla densità mezza attuale dell'universo è perfino maggiore. Se sommammo le masse di tutte le stelle che

possiamo vedere tanto nella nostra galassia come nelle altre galassie, il totale è meno della centesimo parte della quantità necessaria per fermare l'espansione dell'universo, perfino considerando la stima più bassa del ritmo di espansione. La nostra galassia e le altre galassie devono contenere, nonostante, una gran quantità di "materia oscura" che non può vedersi direttamente, ma che sappiamo che deve esistere, dovuto all'influenza della sua attrazione gravitazionale sulle orbite delle stelle nelle galassie. Inoltre, la maggioranza delle galassie si trovano attorniate in grappoli, e possiamo inferire ugualmente la presenza di ancora più materia oscura negli spazi intergalattici dei grappoli, dovuto al suo effetto sul movimento delle galassie. Quando sommammo tutta questa materia oscura, otteniamo solamente la decima parte, approssimativamente, della quantità richiesta per fermare l'espansione.  Nonostante, non possiamo escludere la possibilità che potesse esistere alcuno altra forma di materia, distribuita quasi uniformemente molto alla cosa e largo dell'universo che non abbiamo scoperto ancora e che potrebbe elevare la densità mezza dell'universo al di sopra del valore critico necessario per fermare l'espansione. L'evidenza presente suggerisce, pertanto, che l'universo si espanderà probabilmente per sempre, ma che della cosa unica che possiamo stare davvero sicuri è che se l'universo andasse a collassare, non lo farebbe come minimo in altri diecimila milioni di anni, poiché stato espandendosi per lo meno quella quantità di tempo. Questo non dovrebbe preoccuparci indebitamente: per allora, almeno che abbiamo colonizzato oltre il sistema solare, l'umanità farà tempo che sarà sparito, estinta insieme al nostro Sole! Tutte le soluzioni di Friedmann condividono il fatto che in qualche tempo scorso, tra dieci e venti mille milioni di anni, la distanza tra galassie vicine è dovuta essere zero. In quell'istante che chiamiamo *big bang,* la densità dell'universo e la curvatura dello spazio-tempo sarebbero stati infinite.  Dato che la matematica non può maneggiare realmente numeri infiniti, questo significa che la teoria della relatività generale, nella quale si basano le soluzioni di Friedmann, predice che c'è un punto nell'universo dove la teoria in sé collassa. Tale punto è un esempio di quello che i matematici chiamano una singolarità. In realtà, tutte le nostre teorie scientifiche sono formulate sotto la supposizione che l'espaciotiempo - è uniforme e quasi piano, in modo che esse smettono di essere applicabili nella singolarità del *big bang dove* la curvatura dello spazio-tempo è infinita.  Ciò significa che benché ci fossero avvenimenti anteriori al *big bang, non* potrebbero utilizzarsi per determinare quello che succederebbe dopo, poiché ogni capacità di predizione cederebbe nel *big bang.* Ugualmente, se, come è il caso, sappiamo solo quello che è successo dopo il *big bang, non* potremo determinare quello che succedè prima. Dal nostro punto di vista, gli eventi anteriori al *big bang non* possono avere conseguenze, per quello che non dovrebbero fare parte dei modelli scientifici dell'universo. Perciò, dovremmo estrarrli di qualunque modella e dire che il tempo ha il suo principio nel *big bang.*

A molta gente non gli piace l'idea che il tempo abbia un principio, probabilmente perché suona ad intervento divino. , La Chiesa cattolica, al contrario, si appropriò del

modello del *big bang* ed in 1951 proclamò ufficialmente che era di accordo col Bibbia. Per ciò, ci fu un buon numero di tentativi per evitare la conclusione che c'era stato un *big bang.* La proposta che ottenne un appoggio più ampio fu la chiamata teoria dello stato stazionario, *steady state.* Fu suggerita, in 1948, per due rifugiati dell'Austria occupata per i nazisti, Hermann Bond e Thomas Gold, insieme ad un britannico, Fred Hoyle, che aveva lavorato con essi durante la guerra nello sviluppo del radar. L'idea era che conformi le galassie si andavano allontanando alcune di altre, nuove galassie si formavano continuamente nelle regioni intergalattiche, a partire da materia nuova che era creata di forma continua. L'universo sembrerebbe, perciò, approssimativamente lo stesso in ogni tempo ed in ogni punto dello spazio. La teoria dello stato stazionario richiedeva una modificazione della relatività generale per permettere la creazione continua di materia, ma il ritmo di creazione incluso era tanto basso, approssimativamente una particella per chilometro cubo all'anno che non stava in conflitto con gli esperimenti. La teoria era una buona teoria scientifica, nel senso descritto nel capitolo 1: era semplice e realizzava predizioni concrete che potrebbero essere comprovate per l'osservazione. Una di queste predizioni era che il numero di galassie, od oggetti simili in qualunque volume dato dello spazio, dovrebbe essere lo stesso dove voglia e quando voglia che guardassimo nell'universo. Alla fine degli anni cinquanta e principio dei sessanta, un gruppo di astronomi diretto per Martín Ryle chi aveva lavorato anche con Bond, Gold e Hoyle nel radar durante la guerra, realizzò, a Cambridge, un studio su fonti di onde di radio nello spazio esterno. Il gruppo di Cambridge dimostrò che la maggioranza di queste fonti di radio devono risiedere fuori della nostra galassia, molte di esse potevano essere concordi veramente con altre galassie, e, anche, che c'erano molte più fonti deboli che intense. Interpretarono che le fonti deboli erano le più distanti, mentre le intense erano le più vicine. Allora risultava c'essere meno fonti comuni per unità di volume per le fonti vicine che per le lontane. Questo potrebbe significare che stiamo in una regione dell'universo nel quale le fonti sono più scarse che nel resto. Alternativamente, potrebbe significare che le fonti erano più numerose nel passato, nell'epoca in cui le onde di radio cominciarono il suo viaggio verso noi che ora. Qualunque spiegazione contraddiceva le predizioni della teoria dello stato stazionario. Inoltre, la scoperta della radiazione di microonde per Penzias e Wilson in 1965 indicò anche che l'universo è dovuto essere molto più denso nel passato. La teoria dello stato stazionario aveva, pertanto, che essere abbandonata.

Un altro tentativo di evitare la conclusione che ha dovuto avere un *big bang* e, pertanto, un principio del tempo, fu realizzato da due scienziati russi, Evgenii Lifshitz ed Isaac Khalatnikov, in 1963. Essi suggerirono che il *big bang potrebbe* essere, unicamente, una peculiarità dei modelli di Friedmann che non erano dopo tutto più che avvicinamenti all'universo reale. Magari, di tutti i modelli che erano approssimativamente come l'universo reale, quelli di Friedmann contenessero solo una singolarità come quella del *big bang.* Nei modelli di Friedmann, tutte le galassie si stanno allontanando direttamente alcune di altre, di tale modo che non è sorprendente

che in qualche tempo scorso stessero tutte giunte nello stesso posto.  Nell'universo reale, tuttavia, le galassie non hanno solo un movimento di separazione di alcune rispetto ad altre, ma hanno anche piccole velocità laterali. Così, in realtà, non hanno mai perché essere stato esattamente tutte nello stesso posto, bensì semplicemente molto vicino alcune di altre. Magari allora l'universo in espansione attuale non sarebbe derivato da una singolarità come il *big bang,* bensì di, una fase previa in contrazione. Quando l'universo collassò, le particelle che lo formassero non avrebbero potuto urtare tutte tra sé, ma si sarebbero incrociati e separato dopo, producendo l'espansione attuale dell'universo. Come potremmo distinguere allora se l'universo reale ha cominciato con un *big bang* o no? Quello che Lifshitz e Khalatnikov fecero fu studiare modelli dell'universo che erano approssimativamente come quelli di Friedmann, ma che avevano in conto le irregolarità e le velocità aleatorie delle galassie nell'universo reale. Dimostrarono che tali 'Modelli potrebbero cominciare con un *big bang,* perfino malgrado le galassie si non stessero separando oramai direttamente alcune di altre, ma sostennero che ciò continuava solo ad essere possibile in certi modelli eccezionali nel quale le galassie si muovevano giustamente nella forma adeguata. Argomentarono che, poiché sembra c'essere infinitamente più modelli del tipo Friedmann senza una singolarità come quella del *big bang* che con una, dovrebbe concludersi che in realtà non è esistito il *big bang.* Tuttavia, più tardi si resero conto che c'era una classe molto più generale di modelli del tipo Friedmann che sì contenevano singolarità, e nei quali le galassie non dovevano stare muovendosi di un modo speciale. Perciò, ritirarono la sua affermazione in 1970.

Il lavoro di Lifshitz e Khalatnikov fu molto prezioso perché dimostrò che l'universo avrebbe potuto avere una singolarità, un *big bang,* se la teoria della relatività generale era corretta. Tuttavia, non risolse la questione fondamentale: predice la teoria della relatività generale che il nostro universo avrebbe dovuto avere un *big bang,* un principio del tempo? La risposta arrivò attraverso un avvicinamento completamente differente, cominciata per un fisico e matematico britannico, Roger Penrose**,** in 1965. Usando il modo in cui i coni di luce si comportano nella relatività generale, insieme al fatto che la gravità è sempre attraente, dimostrò che una stella che collassa abbassa la sua propria gravità è acchiappata in una regione il cui superficie si diminuisce col tempo a volume zero.  E, se la superficie della regione si diminuisce a zero, la stessa cosa deve succedere col suo volume. Tutta la materia della stella sarà compressa in una regione di volume nullo, di tale forma che la densità di materia e la curvatura dello spazio-tempo diventeranno infinite.  In altre parole, si ottiene una singolarità contenuta dentro una regione dello spazio-tempo chiamato buco nero.

A prima vista, il risultato di Penrose si applica solo a stelle. Non ha niente a che vedere con la questione di se l'universo intero ebbe, nel passato, una singolarità del tipo del *big bang.* Nonostante, quando Penrose presentò il suo teorema, io ero un studente di ricerca che cercava disperatamente un problema col che completare la tesi dottorale.

Due anni prima, mi era stato diagnosticato la malattia ALS, comunemente conosciuta come malattia di Lou Gehrig o dei neuroni motoscafi, e mi ero fatto capire che mi rimanevano solo uno o due anni di vita. In queste circostanze non sembrava avere troppo senso lavorare nella tesi dottorale, perché non sperava di sopravvivere tanto tempo. Nonostante quello, avevano trascorso due anni e non mi trovavo molto peggio. In realtà, le cose mi andavano abbastanza bene e mi ero promesso con una ragazza affascinante, Jane Wilde.  Ma per potermi sposare, aveva bisogno di un lavoro, e per poterlo ottenere, aveva bisogno del dottorato.

In 1965, lessi circa il teorema di Penrose secondo il quale qualunque corpo che soffrisse un collasso gravitazionale dovrebbe formare finalmente una singolarità. Pronto compresi che se si investisse la direzione del tempo nel teorema di Penrose, in modo che il collasso si trasformasse in un'espansione, le condizioni del teorema continuerebbero a verificarsi, purché l'universo a gran scala fuori, attualmente, approssimativamente come un modello di Friedmann. Il teorema di Penrose aveva dimostrato che qualunque stella che collassi deve finire in una singolarità. Lo stesso argomento col tempo invertito dimostrò che qualunque universo in espansione, del tipo di Friedmann, ha dovuto cominciare in una singolarità. Per ragioni tecniche, il teorema di Penrose richiedeva che l'universo fosse infinito spazialmente. Conseguentemente, poteva utilizzarlo solo per provare che dovrebbe avere una singolarità se l'universo si stesse espandendo il sufficientemente rapido come per evitare di collassare di nuovo, poiché solo questi modelli di Friedmann erano infinito espacialmente Durante - gli anni seguenti, mi dedicai a sviluppare nuove tecniche matematiche per eliminare l'anteriore ed altri differenti requisiti tecnici dei teoremi che provavano che le singolarità devono esistere. Il risultato finale fu un articolo unito tra Penrose ed io, in 1970, che alla fine provò che ha dovuto avere una singolarità come quella del *big bang,* con l'unica condizione che la relatività generale sia corretta e che l'universo contenga tanta materia come osserviamo. Ci fu una forte opposizione al nostro lavoro, da parte dei russi, dovuto alla sua credenza marxista nel determinismo scientifico, e da parte della gente che credeva che l'idea in sé delle singolarità era ripugnante e rovinava la bellezza della teoria di Einstein. Nonostante, uno non può discutere contro un teorema matematico. Così, alla fine, il nostro lavoro arrivò ad essere generalmente accettato e, oggigiorno, quasi tutto il mondo suppone che l'universo cominciò con una singolarità come quella del *big bang.* Risulta per quel motivo ironico che, avendo cambiato le mie idee, stia tentando ora di convincere gli altri fisici che non ci fu all'inizio in realtà singolarità dell'universo. Come vedremo più avanti, questa può sparire una volta che gli effetti quantici si tengono in conto.

Abbiamo visto in questo capitolo come, in meno di mezzo secolo, la nostra visione dell'universo, formata per millenni, si è trasformato. La scoperta di Hubble che l'universo si sta espandendo, ed il darci conta della piccolezza del nostro pianeta nell'immensità dell'universo, furono solo il punto di partenza. Come l'evidenza

sperimentale e teorica si andava accumulando, si chiarificava sempre di più che l'universo ha dovuto avere un principio nel tempo, fino a che in 1970 questo fu finalmente provato per Penrose e per me, sulla base della teoria della relatività generale di Einstein. Quella prova dimostrò che la relatività generale è solo una teoria incompleta: non può dirci come incominciò l'universo, perché predice che tutte le teorie fisiche, compresa lei stessa, falliscono all'inizio dell'universo. Nonostante, la relatività generale pretende solo di essere una teoria parziale, in modo che quello che il teorema della singolarità realmente dimostrazione è che aveva dovuto avere un tempo, molto all'inizio dell'universo in che questo era tanto piccolo che non possono ignorarsi oramai gli effetti di piccola scala dell'altra gran teoria parziale del secolo xx, la meccanica quantica. Al principio degli anni settanta, ci vedemmo forzati a girare la nostra ricerca di un intendimento dell'universo, dalla nostra teoria dello straordinariamente immenso, fino alla nostra teoria dello straordinariamente minuto. Questa teoria, la meccanica quantica, si descriverà di seguito, prima di tornare a spiegare gli sforzi realizzati per combinare le due teorie parziali in un'unica teoria quantica della gravità.

# Capitolo 4

## IL PRINCIPIO DI INCERTEZZA

Il successo delle teorie scientifiche, ed in questione quello della teoria della gravità di Newton, portò allo scienziato francese marchese di Laplace ad argomentare, agli inizi del secolo xix che l'universo era completamente determinista. Laplace suggerì che doveva esistere un insieme di leggi scientifiche che ci permetterebbero di predire tutto quello che succedesse nell'universo, purché conoscessimo lo stato completo dell'universo in un istante di tempo. Per esempio, se sapessimo le posizioni e velocità del Sole e dei pianeti in un determinato momento, potremmo usare allora le leggi Newton per calcolare lo stato del sistema solare in qualunque altro istante. Il determinismo sembra abbastanza ovvio in questo caso, ma Laplace fu più lontano fino a supporre che c'erano leggi simili governando tutti i fenomeni, compreso il comportamento umano.

La dottrina del determinismo scientifico fu ampiamente criticata per diversi settori che pensavano che infrangeva la libertà divina di intervenire nel mondo, ma, nonostante ciò, costituì il paradigma della scienza fino ai primi anni del nostro secolo. Una delle prime indicazioni che questa credenza dovrebbe essere abbandonata arrivò quando i calcoli degli scienziati britannico lord Rayleigh e sir James Jeans suggerirono che un oggetto o corpo caldo, come una stella, dovrebbe irradiare energia ad un ritmo infinito. Di accordo con le leggi nelle che si credeva in quello tempo, un corpo caldo dovrebbe emettere onde elettromagnetiche, tali come onde di radio, luce visibile o raggi X, con uguale intensità a tutte le frequenze. Per esempio, un corpo caldo dovrebbe irradiare la stessa quantità di energia, tanto in onde con frequenze comprese tra uno e due miliardi di cicli per secondo, come in onde con frequenze comprese in due e tre miliardi di cicli per secondo. Dato che il numero di cicli per secondo è illimitato, questo significherebbe allora che l'energia totale irradiata sarebbe infinita.

Per evitare questo risultato, ovviamente ridicolo, lo scienziato tedesco Max Planck suggerì in 1900 che la luce, i raggi X ed altri tipi di onde non potevano essere emessi in quantità arbitrarie, bensì solo in certi pacchetti che egli chiamò "quanti." Inoltre, ognuno di essi possedeva una certa quantità di energia che era quanto più tanto maggiore dimissione fosse la frequenza delle onde, di tale forma che ferma frequenze sufficientemente alte l'emissione di un unica quanto richiederebbe più energia del che poteva ottenersi. Così la radiazione di alte frequenze si diminuirebbe, ed il ritmo col quale il corpo perdeva energia sarebbe, pertanto, finito.
L'ipotesi quantica spiegò molto bene l'emissione di radiazione per corpi caldi, ma le sue applicazioni circa il determinismo non furono comprese fino a 1926, quando un

altro scienziato tedesco, Werner Heisenberg, formulò il suo famoso principio di incertezza. Per potere predire la posizione e la velocità future di una particella, bisogna essere capace di misurare con precisione la sua posizione e velocità attuali. Il modo ovvio di farlo è illuminando con luce la particella. Alcune delle onde luminose saranno disperse per la particella, quello che indicherà la sua posizione. Tuttavia, uno non potrà essere capace di determinare la posizione della particella con maggiore precisione che la distanza in due creste consecutive dell'onda luminosa, per quello che si deve utilizzare luce di molto breve longitudine di onda per potere misurare la posizione della particella con precisione. Ma, secondo l'ipotesi di Planck, non può usare una quantità arbitrariamente piccola luce; deve usare come minimo un quanto di luce. Questo quanto perturberà la particella, cambiando la sua velocità in una quantità che non può essere predicha. Inoltre, quanto con maggiore precisione si misuri la posizione, minorenne sarà la longitudine di onda della luce che si necessiti e, pertanto, maggiore sarà l'energia del quanto che debba usare. Così la velocità della particella risulterà fortemente perturbata. In altre parole, quanto con maggiore precisione si tenti di misurare la posizione della particella, con minore esattezza si potrà misurare la sua velocità, e viceversa. Heisenberg dimostrò che l'incertezza nella posizione della particella, moltiplicata per l'incertezza nella sua velocità e per la massa della particella, non può essere mai più piccola di una certa quantità, che si conosce come costante di Planck. Inoltre, questo limite non dipende dalla forma in cui uno tratta di misurare la posizione o la velocità della particella, o del tipo di particella: il principio di incertezza di Heisenberg è una proprietà fondamentale, ineludibile, del mondo.

Il principio di incertezza ha profonde applicazioni sul modo che abbiamo di vedere il mondo. Perfino più di cinquanta anni dopo, queste non sono state completamente apprezzate da molti filosofi, e sono ancora oggetto di molta controversia. Il principio di incertezza segnò il fine del sonno di Laplace di una teoria della scienza, un modello dell'universo che sarebbe totalmente determinista: certamente, non possono predirsi gli avvenimenti futuri con esattezza se neanche può misurarsi lo stato presente dell'universo di forma precisa! Potremmo supporre ancora che esiste un insieme di leggi che determina completamente gli avvenimenti per qualche essere soprannaturale che potrebbe osservare lo stato presente dell'universo senza perturbarlo. Tuttavia, tali modelli dell'universo non sono di troppo interesse per noi, ordinari mortali. Sembra meglio usare il principio di economia conosciuto come "lametta di Occam" ed eliminare tutti gli elementi della teoria che non possano essere osservati. Questo avvicinamento portò in 1920 a Heisenberg, Erwin Schrijdinger e Paul Dirae a riformulare la meccanica con una nuova teoria chiamata meccanica quantica, basata nel principio di incertezza. In questa teoria le particelle non possiedono oramai a parte posizioni e velocità definite, perché queste non potrebbero essere osservate. Invece di ciò, le particelle hanno un stato quantico che è una combinazione di posizione e velocità.

In generale, la meccanica quantica non predice un unico risultato di ogni osservazione. Nel suo posto, predice un certo numero di risultati possibili e ci dà le probabilità di ognuno di essi. Cioè, se si realizzasse la stessa dosata su un gran numero di sistemi simili, con le stesse condizioni di partenza in ognuno di essi, si troverebbe che il risultato della misura sarebbe Ad un certo numero di volte, B un altro numero differente di volte, e così via. Potrebbe predirsi il numero approssimato di volte che si otterrebbe il risultato Ad o il B, ma non potrebbe predirsi il risultato specifico di una misura concreta. Perciò, la meccanica quantica introduce un elemento inevitabile di incapacità di predizione, un'aleatorietà nella scienza. Einstein si opporsi fortemente a ciò, nonostante l'importante carta che egli stesso aveva giocato nello sviluppo di queste idee. Einstein ricevè il premio Nobel per la sua contribuzione alla teoria quantica. Nonostante, Einstein non accettò mai che l'universo fosse governato per il caso. Le sue idee al riguardo sono riassunte nel suo famoso frase Dio non gioca ai "dadi." La maggioranza del resto degli scienziati, tuttavia, accettarono senza problemi la meccanica quantica perché era perfettamente di accordo con gli esperimenti. Veramente, è stato una teoria con un successo eccellente, ed in lei si basano quasi tutta la scienza e la tecnologia moderne.  Governa il comportamento dei transistor e dei circuiti integrati che sono i componenti essenziali degli apparati elettronici, tali come televisori e computer, e è anche la base della chimica e della biologia moderne. Le uniche aree delle scienze fisiche nelle quali la meccanica quantica non è stata ancora adeguatamente incorporata sono quelle della gravità e la struttura a gran scala dell'universo.

Benché la luce sia formata per onde, l'ipotesi dei quanti di Planck ci dice che in alcuni aspetti si comporta come se fosse composta per particelle: può essere solo emessa o assorbita in pacchetti o quanti. Ugualmente, il principio di incertezza di Heisenberg implica che le particelle si comportano in alcuni aspetti come onde: non hanno una posizione ben definita, ma sono "sparse" con una certa distribuzione di probabilità. La teoria della meccanica quantica è basata in una descrizione matematica completamente nuova che non descrive oramai al mondo reale in termini di particelle ed onde; solo le osservazioni del mondo possono essere descritte in quelli termini. Esiste così, pertanto, una dualità tra onde e particelle nella meccanica quantica: per alcuni fine è utile pensare alle particelle come onde, mentre per altri è migliore pensare alle onde come particelle. Una conseguenza importante della cosa anteriore, è che può osservarsi in due la magnifica chiamata di interferenza insiemi di onde o di particelle. Cioè, le creste di uno degli insiemi di onde possono coincidere con le valli dell'altro insieme. In questo caso i due insiemi di onde si cancellano mutuamente, invece di sommarsi formando un'onda più intensa, come potrebbe sperarsi, figura 4.1. Un esempio familiare di interferenza nel caso della luce lo costituiscono i colori che frequentemente appaiono nelle pompe di sapone. Questi sono causati per la riflessione della luce nelle due viso della magra cappa di acqua che forma la pompa. La luce bianca è composta per onde luminose di tutte le longitudini di onde o, quello

che è la stessa cosa, di tutti i colori. Per certe longitudini di onda, le creste delle onde specchiate in un viso della pompa di sapone coincidono con le valli dell'onda specchiata nell'altro viso.  I colori corrispondenti a dette longitudini di onda sono assenti nella luce specchiata che pertanto si mostra colorata.

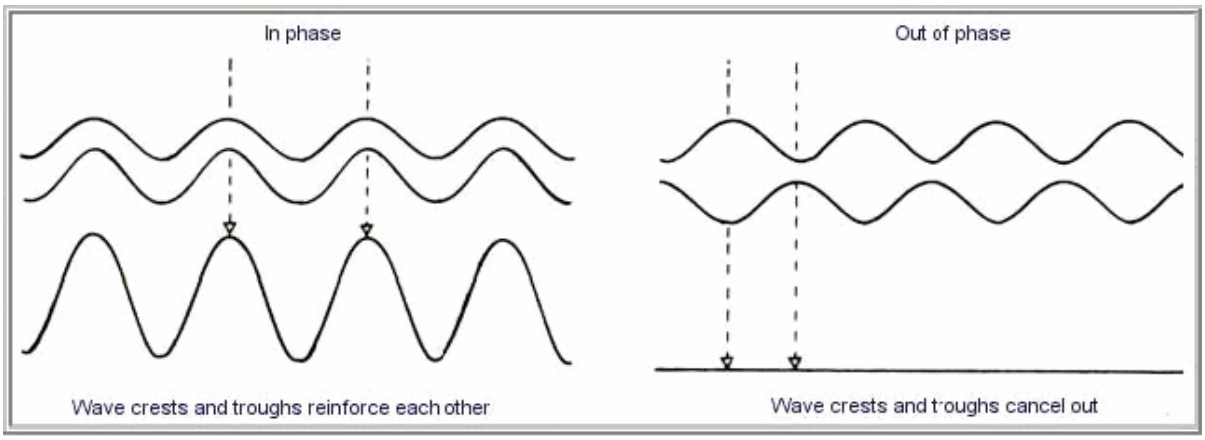



Figura 4:1

Anche l'interferenza può prodursisi con particelle, dovuto alla dualità introdotta per la meccanica quantica. Un esempio famoso è l'esperimento chiamato delle due fenditure, figura 4.2. Consideriamo una fine parete con due fenditure parallele. In un lato della parete si impiega una fonte luminosa di un determinato colore, cioè, di una longitudine di onda particolare. La maggior parte della luce sbatterà contro la parete, ma una piccola quantità attraverserà le fenditure. Supponiamo, allora, che si situa un schermo nel lato opposto, rispetto alla parete, della fonte luminosa.  Qualunque punto dello schermo riceverà luce delle due fenditure. Tuttavia, la distanza che deve viaggiare la luce dalla fonte allo schermo, attraversando ognuna delle fenditure, sarà, in generale, differente. Questo significherà che le onde provenienti delle due fenditure non staranno in fase tra sé quando arrivino allo schermo: in alcuni posti le onde si cancelleranno tra sé, ed in altri
si rafforzeranno mutuamente. Il risultato è un caratteristico diagramma di frange luminose ed offuschi.

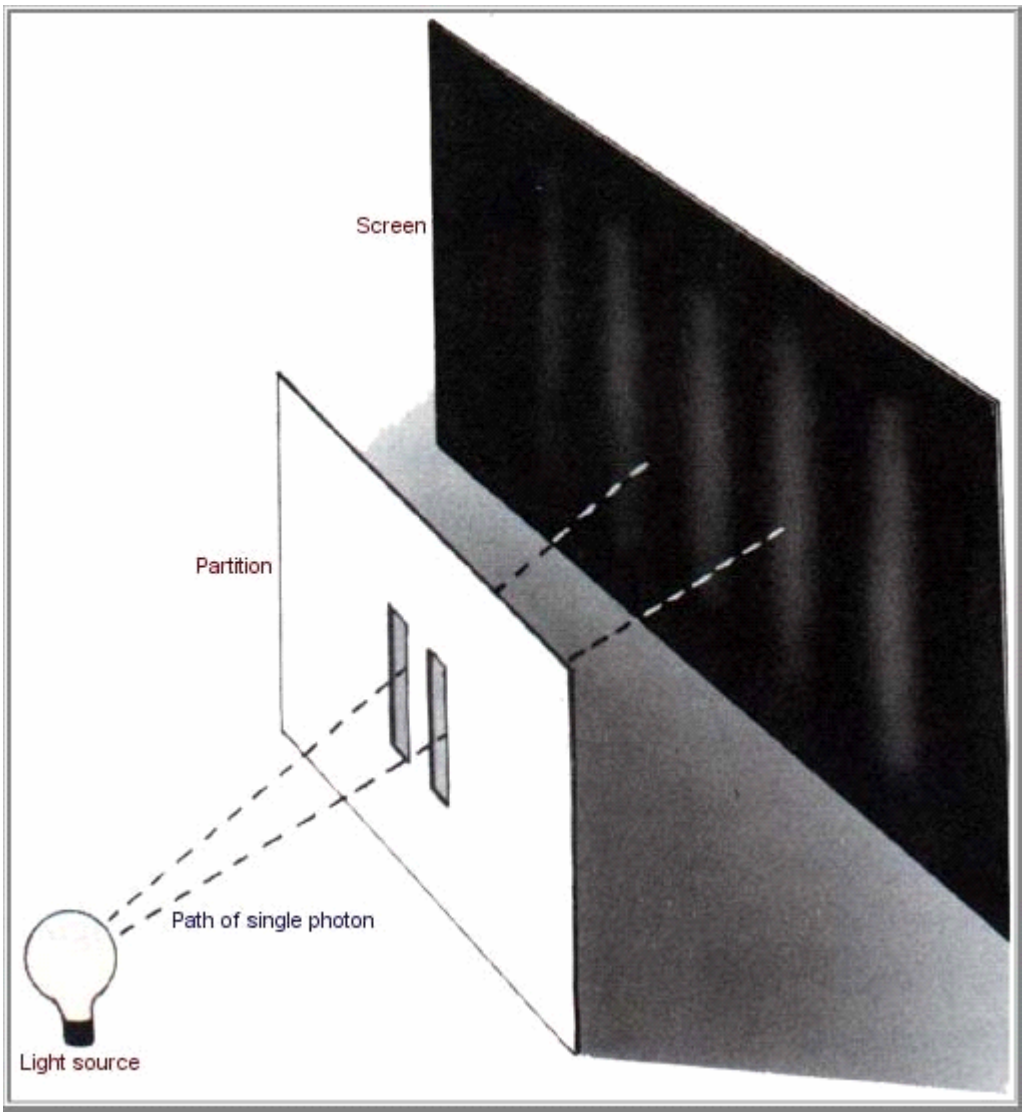



Figura 4:2

La cosa più notevole è che si ottiene esattamente lo stesso tipo di frange se si rimpiazza la fonte luminosa per una fonte di particelle, tali come elettroni, con la stessa velocità, quello che significa che le onde corrispondenti possiedono un'unica longitudine di onda. Ciò posto vacante molto peculiare perché, se si tiene solo una fenditura, non si ottengono frange, bensì semplicemente una distribuzione uniforme di elettroni alla cosa molto e largo dello schermo. Caprina pensare, pertanto, che semplicemente l'apertura dell'altra fenditura aumenterebbe il numero di elettroni che sbattono in ogni punto dello schermo, ma, dovuto all'interferenza, realmente questo numero diminuisce in alcuni posti. Se gli elettroni si inviano attraverso le fenditure di uno in uno, si aspetterebbe che ogni elettrone passasse, o attraverso una fenditura, o attraverso l'altra, in modo che si comporterebbe giusto uguale a come se la fenditura per la quale passò fuori l'unica che esistesse, producendo una distribuzione uniforme sullo schermo. Nella realtà, tuttavia, benché gli elettroni si inviino di uno in uno, le

frange continuano ad apparire. Perciò, ogni elettrone dovere passare contemporaneamente attraverso le *due* fenditure!

Il fenomeno dell'interferenza tra particelle è stato cruciale per la comprensione della struttura degli atomi, le unità basilari della chimica e della biologia, ed i mattoni a partire dai quali noi, e tutte le cose ad intorno nostro, siamo formati. Al principio di questo secolo si credè che gli atomi erano abbastanza simili ai pianeti girando attorno al Sole, con gli elettroni (particelle di elettricità negativa  girando attorno al nucleo centrale, che possiede elettricità positiva. Si suppose che l'attrazione tra l'elettricità positiva e la negativa manterrebbe agli elettroni nelle sue orbite, così come l'attrazione gravitazionale tra il Sole ed i pianeti mantiene a questi nelle sue orbite. Il problema con questo modello risiedeva in che le leggi della meccanica e l'elettricità predicevano, prima che esistesse la meccanica quantica che gli elettroni perderebbero energia e cadrebbero girando in spirale, fino a che urtassero col nucleo. Questo implicherebbe che l'atomo, ed in realtà tutta la materia, dovrebbe collassare rapidamente ad un stato di molto alta densità. Una soluzione parziale a questo problema la trovò lo scienziato danese Niels Bohr in 1913. Suggerì che magari gli elettroni non erano capaci di girare a qualunque distanza del nucleo centrale, bensì solo a certe distanze specifichi. Se si supponesse anche che solo uno o due elettroni potevano orbitare ad ognuna di queste distanze, si risolverebbe il problema del collasso dell'atomo, perché gli elettroni non potrebbero cadere in spirale oltre la cosa necessaria, per riempire le orbite corrispondenti alle minori distanze ed energie.

Questo modello spiegò abbastanza bene la struttura dell'atomo più semplice, l'idrogeno, che ha solo un elettrone girando attorno al nucleo. Ma non era chiaro come dovrebbe estendersi la teoria ad atomi più complicati. Inoltre, l'idea di un insieme limitato di orbite permesse sembrava molto arbitraria. La nuova teoria della meccanica quantica risolse questa difficoltà. Rivelò che un elettrone girando attorno al nucleo potrebbe immaginarsi come un'onda, con una longitudine di onda che dipendeva dalla sua velocità. Esisterebbero certe orbite il cui longitudine corrisponderebbe ad un numero intero, cioè, un numero non frazionario, di longitudini di onda dell'elettrone. Per queste orbite le creste delle onde starebbero nella stessa posizione in ogni giro, in modo che le onde si sommerebbero: queste orbite corrisponderebbero alle orbite permesse di Bohr. Al contrario, per orbite i cui longitudini non fossero un numero intero di longitudini di onda, ogni cresta dell'onda sarebbe finalmente cancellata per una valle, quando l'elettrone passasse di nuovo; queste orbite non sarebbero permesse. Un modo interessante di visualizzare la dualità onda-particella è attraverso il metodo conosciuto come somma su storie possibili, inventato per lo scienziato nordamericano Richard Feynman. In questo avvicinamento, la particella si suppone che non segue un'unica storia o strada nello spazio-tempo, come farebbe in una teoria classica, nel senso di non quantica.  Invece di questo, si suppone che la particella va di Ad a B attraverso tutte le strade possibili. Ad ogni cammino gli è associato un paio di numeri:

uno rappresenta il volume di un'onda e l'altro rappresenta la posizione nel ciclo, cioè, se si tratta di una cresta o di una valle, per esempio.  La probabilità di andare di Ad a B si trova sommando le onde associate a tutte le strade possibili. Se si confronta un insieme di strade vicine, nel caso generale, le fasi o posizioni nel ciclo differiranno enormemente.  Questo significa che le onde associate con queste strade si cancelleranno quasi esattamente tra sé. Tuttavia, per alcuni insiemi di strade vicine, le fasi non varieranno molto di uno ad altro; le onde di queste strade non si cancelleranno.  Dette strade corrispondono alle orbite permesse di Bohr.

Con queste idee, sistemate in forma matematica concreta, fu relativamente semplice calcolare le orbite permesse di atomi complessi e perfino di molecole che sono uniti di atomi uniti per elettroni, in orbite che girano attorno a più di un nucleo. Poiché la struttura delle molecole, insieme alle reazioni tra esse, sono il fondamento di tutta la chimica e la biologia, la meccanica quantica ci permette, in principio, predire quasi tutti i fenomeni ad intorno nostro, dentro i limiti imposti per il principio di incertezza. , Nella pratica, tuttavia, i calcoli che si richiedono per sistemi che contengano oltre a pochi elettroni sono tanto complicati che non possono realizzarsi.

La teoria della relatività generale di Einstein sembra governare la struttura a gran scala dell'universo. È cioè quello che si chiama una teoria classica, non tiene in conto il principio di incertezza della meccanica quantica, come dovrebbe fare per essere consistente con altre teorie. La ragione per la quale questo non conduce a nessuna discrepanza con l'osservazione è che tutti i campi gravitazionali che normalmente sperimentiamo, sono molto deboli. Tuttavia, i teoremi sulle singolarità, discussi anteriormente, indicano che il campo gravitazionale dovrà essere molto intenso in, come minimo, due situazioni: i buchi neri ed il *big bang.* In campi così intensi, gli effetti della meccanica quantica dovranno essere importanti. Così, in un certo senso, la relatività generale classica, predicendo punti di densità infinita, predice la sua propria caduta, come la meccanica classica, cioè, non quantica, predisse la sua caduta, suggerendo che gli atomi dovrebbero collassare fino a raggiungere una densità infinita. Non abbiamo ancora una teoria consistente completa che unifichi la relatività generale e la meccanica quantica, ma sì che conosciamo alcune delle caratteristiche che deve possedere. Le conseguenze che queste avrebbero per i buchi neri ed il *big bang si* descriveranno in capitoli posteriori. Per il momento, tuttavia, torniamo ai tentativi recenti di assemblare le teorie parziali delle altre forze della natura in un'unica teoria quantica unificatrice.

# Capitolo 5

## LE PARTICELLE ELEMENTARI E LE FORZE DI LA NATURA

Aristotele credeva che tutta la materia dell'universo fosse composta per quattro elementi basilari: terra, aria, fuoco ed annacqua. Questi elementi soffrivano l'azione di due forze: la gravità o tendenza della terra e dell'acqua ad affondare, e la leggerezza o tendenza dell'aria e del fuoco ad ascendere. Questa divisione dei contenuti dell'universo in materia e forze si continua ancora ad usare oggigiorno.

Credeva anche Aristotele che la materia era continua, cioè, che un pezzo di materia poteva dividersi sempre di più senza limite in parti piccole: non si imbatteva mai uno in un grano di materia che non potesse continuarsi dividendo. Tuttavia, pochi saggi greci, come Democrito, sostenevano che la materia era inerentemente granulare e che tutte le cose erano costituite per un gran numero di diversi tipi differenti di atomi. , Il parola atomo significa 'indivisibile', in greco.  Per secoli, la discussione continuò senza nessuna evidenza reale a beneficio di chiunque delle posizioni, fino a che in 1803, il chimico e fisico britannico John Dalton segnalò che il fatto che i composti chimici si accordassero sempre in certe proporzioni poteva essere spiegato mediante l'agrupamiento di atomi per formare altre unità chiamate molecole. Nonostante, la discussione tra le due scuole di pensiero non si scavò di modo definitivo a beneficio degli atomisti, fino ai primi anni del nostro secolo. Una delle evidenze fisiche più importanti fu quella che proporzionò Einstein.  In un articolo scritto in 1905, poche settimane prima del suo famoso articolo sulla relatività speciale, Einstein segnalò che il fenomeno conosciuto come movimento browniano - il movimento irregolare, aleatorio di piccole particelle di polvere sospese in un liquido - poteva essere spiegato per l'effetto delle collisioni degli atomi del liquido con le particelle di polvere.

In quell'epoca c'erano già sospetti che gli atomi non erano, dopo tutto, indivisibili. Faceva vari anni che un *fellow* del Trinity College, di Cambridge, J. J. Thomson, aveva dimostrato l'esistenza di una particella materiale, chiamato elettrone che aveva una massa minore della millesimo parte della massa dell'atomo più leggero. Egli utilizzò un dispositivo simile al tubo di un apparato di televisione: un filamento metallico incandescente scioglieva gli elettroni che, poiché hanno un carico elettrica negativa, potevano essere accelerati per mezzo di un campo elettrico verso un schermo foderato di fosforo. Quando gli elettroni sbattevano contro lo schermo, si generavano scintillii luminosi. Pronto si capì che questi elettroni dovevano provenire dagli atomi in sé. E, in 1911, il fisico britannico Ernest Rutherford mostrò, finalmente, che gli atomi della materia hanno veramente una struttura interna: sono formati per un nucleo eccessivamente piccolo e con carico positivo, attorno al quale gira un certo numero di elettroni. Egli dedusse questo analizzando il modo in cui le particelle o che sono

particelle con carico positivo emesse per atomi radioattivi, sono derivate urtando con gli atomi.

Al principio si credè che il nucleo dell'atomo fosse formato per elettroni e quantità differenti di una particella con positivo chiamato protone che proviene dal greco e significa 'in primo luogo', perché si credeva che era l'unità fondamentale della quale era fatta la materia. Tuttavia, in 1932, un collega di Rutherford, James Chadwick, scoprì a Cambridge che il nucleo conteneva altre particelle, chiamati neutroni, che avevano quasi la stessa massa che il protone, ma che non possedevano carico elettrico. Chadwick ricevè il premio Nobel per questa scoperta, e fu scelto *master* ['direttore'] di Gonville and Caius College, a Cambridge, la scuola della quale sono ora fellow. Più tardi, dimise come *master dovuto a* disaccordi coi *fellows.* C'è stata un'amara e continua disputa nel *college da quando* un gruppo di giovane *fellows,* al suo ritorno dopo la guerra, decisero per votazione di gettare a molti degli antichi *fellows* dei posti che avevano goduto per molto tempo. Questo fu anteriore alla mia epoca; io entrai a fare parte del *college* in 1965, alla fine dell'amarezza, quando disaccordi simili avevano forzato ugualmente ad un altro *master premiato* col premio Nobel, sir Nevill Mott, a dimettere.

Fino a venti anni fa, si credeva che i protoni ed i neutroni erano particelle "elementari", ma esperimenti nei quali urtavano protoni con altri protoni o con elettroni ad alta velocità indicarono che, in realtà, erano formati per particelle più piccole. Queste particelle furono chiamato *quarks* per il fisico di Caltech, Murray Gell-Mann, che guadagnò il premio Nobel in 1969 per il suo lavoro su dette particelle.  L'origine del nome è un enigmatico appuntamento di James Joyce: "Tre *quarks* per Muster Mark!" Il parola *quark si* suppone che deve pronunciarsi come *quart* ['stanza'], ma con una k alla fine invece di una t, ma normalmente si pronuncia in modo che rima con *lark* ['divertimento'].

Esiste un certo numero di varietà differenti di *quarks:* si crede che ci sia come minimo sei *flavors* ['sapori'] che chiamiamo *up, down, strange, charmed, bottom, e top* ['sopra', 'abbasso', 'estraneo', 'incantesimo', 'fondo' e 'cima'].  Ogni *flavor può* avere uno dei tre possibili "colori", rosso, verde ed azzurro. , Deve notarsi che questi termini sono unicamente etichette: i *quarks* è molto più piccolo della longitudine di onda della luce visibile e, pertanto, non possiedono nessun colore nel senso normale della parola. Si tratta solamente che i fisici moderni sembrano avere alcune forme più immaginative di nominare alle nuove particelle e fenomeni, non si limitano oramai unicamente al greco, Un protone o un neutrone sono costituiti per tre *quarks,* uno di ogni colore. Un protone contiene due *quarks up* ed un *quark down;* un neutrone contiene due *down ed* uno *up.* Possono crearsi particelle costituite per gli altri *quarks (strange  charmed, bottom e top,* ma tutte esse possiedono una massa molto maggiore e decadono molto rapidamente in protoni e neutroni.

Attualmente sappiamo che né gli atomi, né i protoni e neutroni, dentro essi, sono indivisibili. Così la questione è: quali sono le vere particelle elementari, i mattoni basilari coi quali tutte le cose sono fatte? Dato che la longitudine di onda della luce è molto maggiore del volume di un atomo, non possiamo sperare di "guardare" in maniera normale le parti che formano un atomo. Dobbiamo usare qualcosa con una longitudine di onda molto più piccola. Come vedemmo nell'ultimo capitolo, la meccanica quantica ci dice che tutte le particelle sono in realtà onde, e che quanto maggiore è l'energia di una particella, tanto minorenne è la longitudine di onda della sua onda corrispondente. Così, la migliore risposta che può darsi alla nostra domanda dipende dalla cosa alta che sia l'energia che possiamo comunicare alle particelle, perché questa determina la cosa piccola che deve essere la scala di longitudini alla quale possiamo guardare. Queste energie delle particelle si misurano normalmente in un'unità chiamato elettrone-volt. , Nell'esperimento di Thomson con elettroni, si vide che egli usava un campo elettrico per accelerarli. L'energia guadagnata per un elettrone in un campo elettrico di un volt è quella che si conosce come un elettrone-volt. Nel secolo xix, quando le uniche energie di particelle che la gente sapeva come usare erano le ribassi energie di pochi elettrone-volt, generati per reazioni chimiche tali la combustione, si credeva come che gli atomi erano l'unità più piccola. Nell'esperimento di Rutherford, le particelle alfa avevano energie di milioni di elettrone-volt. Ma recentemente, abbiamo imparato ad usare i campi elettromagnetici affinché ci dìano energie di particelle che erano di milioni di elettrone-volt in un principio e che, posteriormente, sono di migliaia di milioni di elettrone-volt. In questo modo, sappiamo che le particelle che si credevano "elementari" venti anni fa, stanno, in realtà, costituite per particelle più piccole. Possono esse, come otteniamo ancora energie maggiori, essere formate per particelle ancora più piccole? Questo è certamente possibile, ma abbiamo alcuni ragioni teoriche per credere che possediamo, o stiamo molto vicino a possedere, una conoscenza dei mattoni fondamentali della natura.

Usando le dualità onda-particelle, discussa nell'ultimo capitolo, tutto nell'universo, includendo la luce e la gravità, può essere descritto in termini di particelle. Queste particelle hanno una proprietà chiamato porcospino. Un modo di immaginarsi il porcospino è rappresentando alle particelle come piccole trottole girando sul suo asse. Tuttavia, questo può indurre ad errore, perché la meccanica quantica ci dice che le particelle non hanno nessun asse ben definito. Quello che ci dice realmente il porcospino di una particella è come si mostra la particella da distinte direzioni. Una particella di porcospino 0 è come un punto: sembra la stessa da tutte le direzioni, figura *5.1 a.* Al contrario, una particella di porcospino 1 è come una freccia: sembra differente da direzioni distinte, figura *5.1 b.* Solo se uno la gita un giro completo, 360 gradi, la particella sembra la stessa. Una particella di porcospino 2 è come una freccia con due teste, figura 5.1 c,: sembra la stessa se si gira calza rovesciata, 180 gradi. Di forma simile, particelle di porcospini più alti sembrano le stesse se sono girate una frazione più piccola di un giro completo. Tutto questo sembra abbastanza semplice,

ma il fatto notevole è che esistono particelle che non sembrano le stesse se uno la gita giusto un giro: bisogna girarli due giri completi! Si dice che tali particelle possiedono porcospino 1/2.

Tutte le particelle conosciute di universo possono dividersi in due gruppi: particelle di porcospino 1/2, le quali formano la materia dell'universo, e particelle di porcospino 0, 1 e 2, le quali, come vedremo, danno luogo alle forze tra le particelle materiali. Le particelle materiali ubbidiscono a quello che si chiama il principio di esclusione di Pane. Fu scoperto in 1925 per un fisico austriaco, Wolfgang Pauli, che fu premiato col premio Nobel in 1945 per detta contribuzione. Egli era il prototipo di fisico teorico: si diceva che perfino la sua sola presenza in una città farebbe che lì gli esperimenti cedessero. Il principio di esclusione di Pauli dice che due particelle simili non possono esistere nello stesso stato, cioè, che non possono avere entrambe la stessa posizione e la stessa velocità, dentro i limiti fissati per il principio di incertezza.  Il principio di esclusione è cruciale perché spiega perché le particelle materiali non collassano ad un stato di molto alta densità, sotto l'influenza delle forze prodotte per le particelle di porcospino 0, 1 e 2: se le particelle materiali stanno quasi nella stessa posizione, devono avere allora velocità differenti, quello che significa che non staranno nella stessa posizione per molto tempo. Se il mondo fosse stato creato senza il principio di esclusione, i *quarks non* formerebbe protoni e neutroni indipendenti ben definiti. Né neanche questi formerebbero, insieme agli elettroni, atomi indipendenti ben definiti. Tutte le particelle collasserebbero formando una "zuppa" densa, più o meno uniforme.

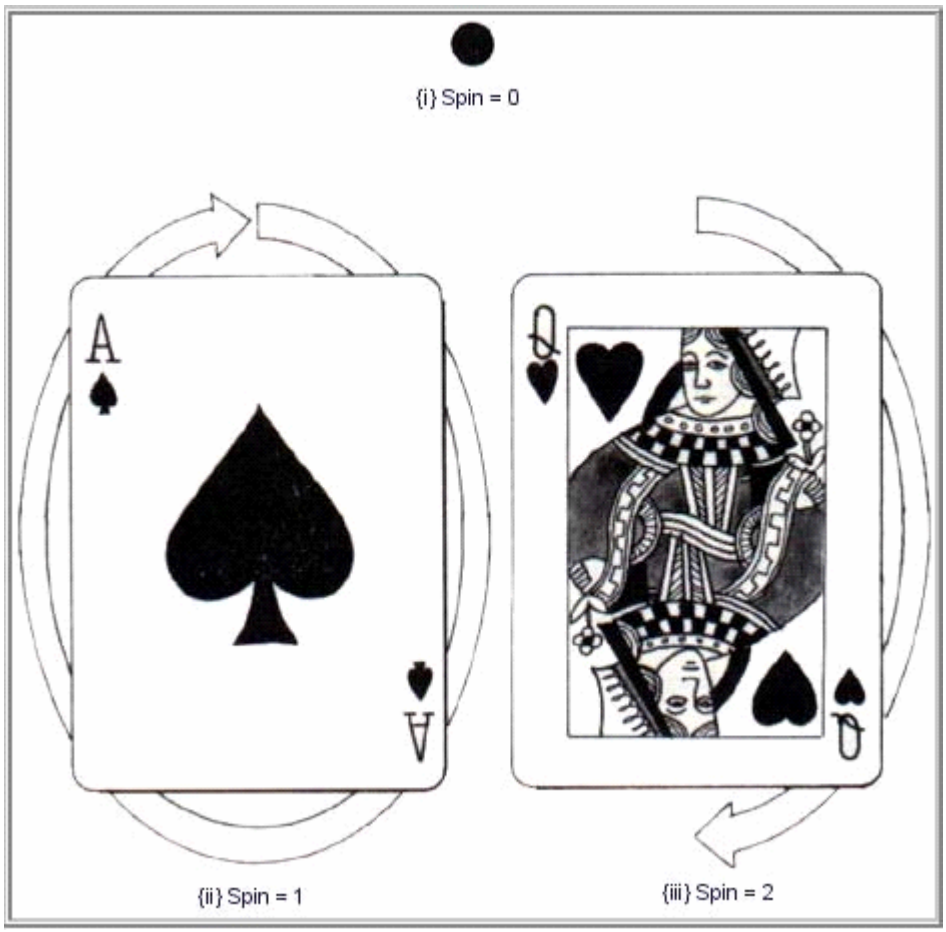



Figura 5:1

Un intendimento adeguato dell'elettrone e delle altre particelle di porcospino 1/2 non arrivò fino a 1928 in cui una teoria soddisfacente fu proposta per Paul Dirac chi più tardi ottenne la cattedra *Lucasian* di Matematica, di Cambridge, la stessa cattedra che Newton aveva ottenuto e che ora io occupo.  La teoria di Dirac fu la prima che era contemporaneamente consistente con la meccanica quantica e con la teoria della relatività speciale. Spiegò matematicamente perché l'elettrone aveva porcospino 1/2, cioè, perché la stessa cosa non sembrava se si girava solo un giro completo, ma sì che lo faceva se si girava due giri. Predisse anche che l'elettrone dovrebbe avere un compagno: l'antielectrón o positrone. La scoperta del positrone in 1932 confermò la teoria di Dirac e suppose quello che gli fossi concesso il premio Nobel di fisica in 1933. Oggigiorno sappiamo che ogni particella ha il suo antipartícula, con la quale può annichilirsi. , Nel caso di particelle portatrici di forze, le antipartículas è le particelle stesse.  Antimundos ed antipersonas interi fatti di antipartículas potrebbero esistere. Ma, se lei si trovi col suo antiyó, non gli dare la mano! Ambedue sparirebbero in un gran scintillio luminoso. Di perché la questione sembra c'essere molte più particelle che antipartículas alla nostra periferia è eccessivamente importante, e la girerò durante questo capitolo.

In meccanica quantica, le forze o interazioni tra particelle materiali, si suppone che sono tutte trasmesse per particelle di porcospino intero, 0, 1 o 2. Quello che succede è che una particella materiale, come un elettrone o un *quark,* emette una particella portatrice di forza. La retrocessione prodotta per questa emissione cambia la velocità la particella materiale. La particella portatrice di forza urta dopo con un'altra particella materiale e è assorbita. Questa collisione cambia la velocità la seconda particella, giostro ugualmente a come se ci fosse stata una forza tra le due particelle materiali.

Una proprietà importante delle particelle portatrici di forza è che non obbediscono al principio di esclusione. Questo significa che non existe.un limite al numero di particelle che possono scambiarsi, per quello che possono dare luogo a forze molto intense. Nonostante, se le particelle portatrici di forza possiedono una gran massa, sarà difficile produrrli e scambiarli a grandi distanze. Così le forze che esse trasmettono saranno di breve portata. Si dice che le particelle portatrici di forza che si scambiano tra sé le particelle materiali, sono particelle virtuali perché, al contrario che le particelle "reali", non possono essere scoperte direttamente per un rivelatore di particelle. Sappiamo che esistono, nonostante, perché hanno un effetto misurabile: producono le forze tra le particelle materiali.  Le particelle di porcospino 0, 1 o 2 esistono anche in alcuni circostanze come particelle reali, ed allora possono essere scoperte direttamente. In questo caso ci sono mostrati come quello che un fisico classico chiamerebbe onde, tali come onde luminose od onde gravitazionali. A volte possono essere emesse quando le particelle materiale interactúan tra sé, per mezzo di un scambio di particelle virtuali portatrici di forza. , Per esempio, la forza elettrica repulsiva in due elettroni è dovuta allo scambio di fotoni virtuali che non possono essere non scoperti mai direttamente; ma, quando un elettrone si incrocia con un altro, possono produrrsi fotoni reali, che scopriamo come onde luminose.

Le particelle portatrici di forza possono raggrupparsi in quattro categorie, di accordo con l'intensità della forza che trasmettono e col tipo di particelle coi quali interactúan. È necessario segnalare che questa divisione in quattro classi è una creazione artificioso dell'uomo; posto vacante conveniente per la costruzione di teorie parziali, ma non può corrispondere a nient'altro profondo. In fondo, la maggioranza dei fisici sperano trovare una teoria unificatrice che spiegherà le quattro forze, come aspetti differenti di un'unica forza.  In realtà, molti direbbero che questo è l'obiettivo principale della fisica contemporanea. Recentemente, si sono realizzati con successo diversi tentativi di unificazione di tre delle quattro categorie di forza, quello che descriverò nel resto di questo capitolo.  La questione dell'unificazione della categoria restante, la gravità, si lascerà per più avanti.
La prima categoria è la forza gravitazionale. Questa forza è universale, nel senso che ogni particella la sperimenta, di accordo con la sua massa o energia.  La gravità è la più debole, con differenza, delle quattro forze; è tanto debole che non la noteremmo in assoluto se non fosse per due proprietà speciali che possiede: può agire a grandi distanze, e è sempre attraente. Questo significa che la forze gravitazionali molto deboli tra le particelle individuali di due corpi grandi, come la Terra ed il Sole, possono

sommarsi tutte e produrre una forza totale molto significativa. Le altre tre forze oppure sono di breve portata, oppure sono a volte attraenti ed a volte repulsive, in modo che tendono a cancellarsi. Dal punto di vista mecano-quantico di considerare il campo gravitazionale, la forza in due particelle materiali si rappresenta trasmessa per una particella di porcospino 2 chiamato gravitón. Questa particella non possiede massa propria, per quello che la forza che trasmette è da lontano portata. La forza gravitazionale tra il Sole e la Terra si attribuisce allo scambio di gravitones tra le particelle che formano questi due corpi. Benché le particelle scambiate siano virtuali, producono certamente un effetto misurabile: fanno girare alla Terra attorno al Sole! Le gravitones reali costituisce quello che i fisici classici chiamerebbero onde gravitazionali che sono molto deboli, e tanto difficili da scoprire che non sono stati ancora osservate.

La seguente categoria è la forza elettromagnetica che interactúa con le particelle cariche elettricamente, come gli elettroni ed i *quarks,* ma non con le particelle senza carico, come i gravitones. È molto più intensa della forza gravitazionale: la forza elettromagnetica in due elettroni è approssimativamente un milione di miliardi di miliardi di miliardi, un 1 con quaranta due zeri dietro, di volte maggiore che la forza gravitazionale. Tuttavia, ci sono due tipi di carico elettrico, positivo e negativa. La forza in due carichi positivi è repulsiva, come la forza in due carichi negativi, ma la forza è attraente tra un carico positivo ed una negativa. Un corpo grande, la Terra o il Sole, contiene come praticamente lo stesso numero di carichi positivi e negativi. Così, le forze attraente e repulsiva tra le particelle individuali si cancellano quasi tra sé, risultando una forza elettromagnetica netta molto debole. Tuttavia, a distanze piccole, tipiche di atomi e molecole, le forze elettromagnetiche dominano. L'attrazione elettromagnetica tra gli elettroni carichi negativamente ed i protoni del nucleo caricati fa positivamente che gli elettroni girino attorno al nucleo dell'atomo, come l'attrazione gravitazionale fa che la Terra giri attorno a Sole. L'attrazione elettromagnetica si rappresenta causata per lo scambio di un gran numero di particelle virtuali senza massa di porcospino 1, chiamati fotoni. Di nuovo, i fotoni che sono scambiati sono particelle virtuali. Nonostante, quando un elettrone cambia un'orbita permessa ad un'altra più vicina al nucleo, si libera energia emettendosi un fotone reale che può essere osservato come luce visibile per l'occhio umano, purché possieda la longitudine di onda adeguata, o per un rivelatore di fotoni, come un film fotografico. Ugualmente, se un fotone reale urta con un atomo, può cambiare ad un elettrone un'orbita vicina al nucleo ad un'altra più lontano. Questo processo consuma l'energia del fotone che, pertanto, è assorbito.

La terza categoria è la chiamata forza nucleare debole che è la responsabile della radioattività e che agisce su tutte le particelle materiali di porcospino 1/2, ma non ecceda le particelle di porcospino 0, 1 o 2, tali come fotoni e gravitones. La forza nucleare debole non si capì bene fino a 1967 in che Abdus Salam, dell'Imperiale College di Londra, e Steven Weinberg, di Harvard, proposero una teoria che unificava questa interazione con la forza elettromagnetica, così come Maxwell aveva unificato l'elettricità ed il magnetismo alcuni cento anni prima. Suggerirono che oltre al fotone c'erano altre tre particelle di porcospino 1, conosciute collettivamente come bosones vettoriali massicce che trasmettono la forza debole. Queste particelle si conoscono

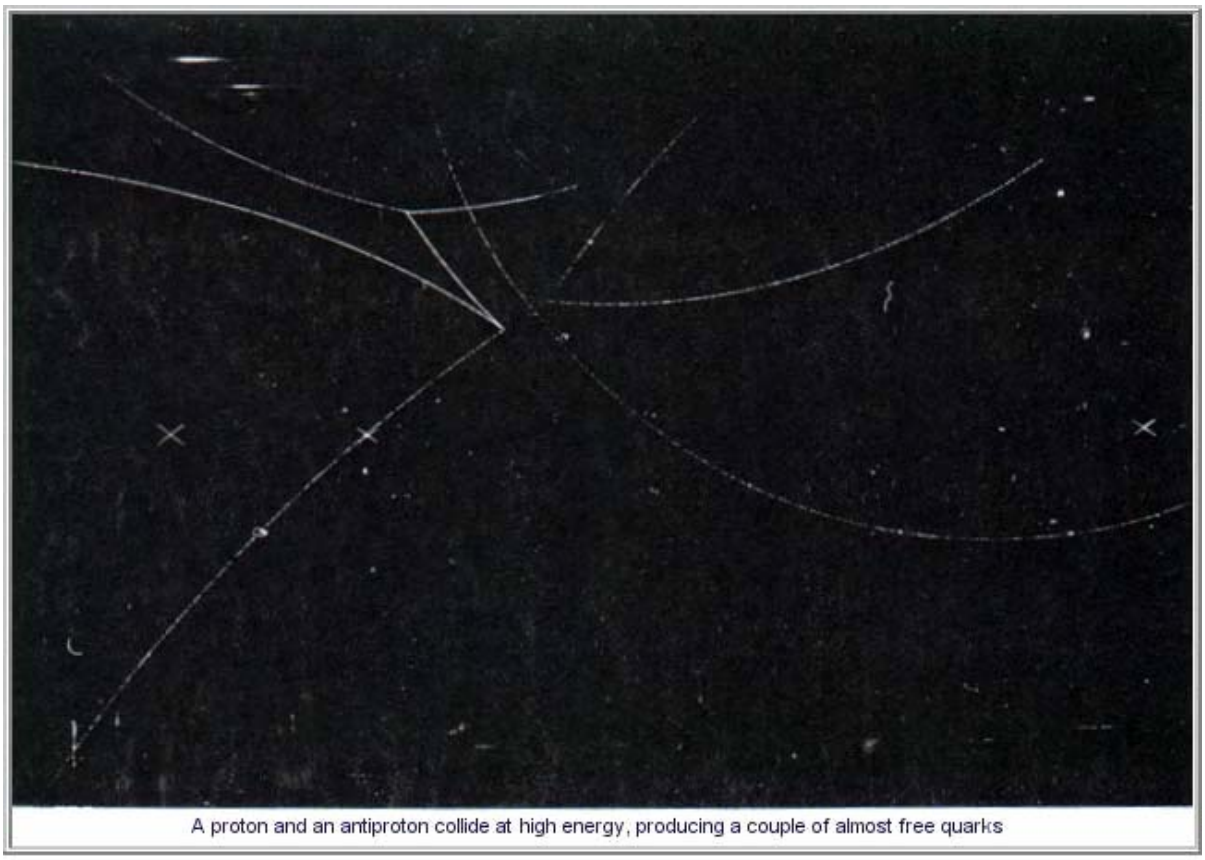
come W+ che si legge più W, W - che si legge W meno, e Z0 che si legge Z zero, ed ognuna possiede una massa di circa 100 GeV, GeV è l'abbreviazione di gigaelectrón-volt, o mille milioni di elettrone-volt.  La teoria di Weinberg-Salam propone una proprietà conosciuta come rottura di simmetria spontanea. Questo vuole dire che quello che, a basse energie, sembra essere un certo numero di particelle completamente differenti è, in realtà, lo stesso tipo di particella, ma in stati differenti. Ad alte energie tutte questi particelle si comportano in maniera simile. L'effetto è sembrato al comportamento di una palla di roulette sulla ruota della roulette. Ad alte energie, quando la ruota gira rapidamente, la palla si comporta essenzialmente di un'unica maniera, gira dando giri un ed un'altra volta. Ma conformi la ruota si va frenando, l'energia della palla diminuisce, fino a che alla fine la palla si ferma in uno dei trenta sette casellari della ruota. In altre parole, a basse energie ci sono trenta sette stati differenti nei quali la palla può esistere. Se, per qualche motivo, potessimo vedere solo la palla a basse energie, allora penseremmo che c'erano trenta sette tipi differenti di palle!

Nella teoria di Weinberg-Salam, ad energie molto maggiore di 100 GeV, le tre nuove particelle ed il fotone si comporterebbero tutte in una maniera simile. Ma ad energie più basse che si danno nella maggioranza delle situazioni normali, questa simmetria tra le particelle si romperebbe. W+, W - e Z0 acquisirebbe grandi masse, facendo che la forza che trasmettono fuori di molto breve portata. Nell'epoca in che Salam e Weinberg proposero la sua teoria, poca gente credè loro e, contemporaneamente, gli acceleratori di particelle non erano i sufficientemente potenti come per raggiungere le energie di 100 GeV richiesti per produrre particelle W+, W - o Z0 reali. Nonostante, durante i dieci anni seguenti, le tre predizioni della teoria a basse energie concordarono tanto bene con gli esperimenti che, in 1979, Salam e Weinberg furono premiati col premio Nobel di fisica, insieme a Sheldon Glashow, anche di Harvard che aveva suggerito una teoria simile di unificazione delle forze elettromagnetiche e nucleari deboli.  Il comitato dei premi Nobel si salvò dal rischio di avere commesso un errore scoprendosi, in 1983 nel CERN (Centro Europeo per la Ricerca Nucleare , le tre particelle con massa compagne del fotone, ed i cui masse ed altre proprietà erano di accordo con le predichas per la teoria. Carlo Rubbia che dirigeva la squadra di varie centinaia di fisici che fece la scoperta, ricevè il premio Nobel, insieme a Simón vanno der Meer, l'ingegnere del CERN che sviluppò il sistema di immagazzinamento di antimateria usato. , È molto difficile realizzare oggigiorno una contribuzione chiave in fisica sperimentale a meno che si stia già nella cima,

La quarta categoria di forza è forte l'interazione nucleare che mantiene ai *quarks* uniti nel protone ed il neutrone, ed ai protoni e neutroni insieme nei nuclei degli atomi. Si crede che questa forza è trasmessa per un'altra particella di porcospino 1, chiamato gluón, che solo interactúa con sé stessa e coi quarks. L'interazione nucleare possiede una curiosa proprietà chiamato confino: sempre lega alle particelle in combinazioni tali che l'insieme totale non ha colore. Non può aversi un unico *quark* isolato perché

avrebbe un colore, rosso, verde o azzurro. Al contrario, un *quark* rosso deve unirsi con un *quark* verde ed un'azzurra per mezzo di una "corda" di gluones, rosso + verde + azzurro = bianco. Una tripletta così, costituisce un protone o un neutrone. Un'altra possibilità è un paio consistente in un *quark* ed un *antiquark,* rosso + antirrojo, o verde + antiverde, o azzurro + antiazul = bianco. Tali combinazioni formano le particelle conosciute come locande che sono instabili perché il *quark* e l'antiquark possono annichilirsi tra sé, producendo elettroni ed altre particelle.  Analogamente, il confino ostacola che si tengano gluones isolati, perché anche i gluones in sé ha colore. Invece di ciò, uno deve avere una collezione di gluones i cui colori si sprofondano per dare il colore bianco. Questa collezione forma una particella instabile chiamato *glueball* ('palla di gluones'.

Il fatto che il confino c'impossibiliti l'osservazione di un *quark* o di un gluón isolati potrebbe sembrare che trasformi come in una questione metafisica la nozione stessa di considerare i *quarks* ed i gluones particelle. Tuttavia, esiste forte un'altra proprietà dell'interazione nucleare, chiamata libertà asintotica che fa che i concetti di *quark* e di gluón siano ben definiti. Ad energie normali, l'interazione nucleare forte è davvero intensa ed unisce fortemente ai *quarks* tra sé. Tuttavia, esperimenti realizzati con grandi acceleratori di particelle indicano che ad alte energie l'interazione forte diventa molto meno intensa, ed *i quarks* ed i gluones si comportano quasi come particelle libere. La figura 5.2 mostra una fotografia di una collisione tra un protone di alta energia ed un antiprotone. In lei, si prodursi vari *quarks* quasi liberi, i cui steli diedero posto ai "getti" che si vedono nella fotografia.



A proton and an antiproton collide at high energy, producing a couple of almost free quarks

Figura 5:2

Il successo dell'unificazione delle forze elettromagnetiche e nucleari deboli produsse un certo numero di tentativi di combinare forte queste due forze con l'interazione nucleare, in quello che si sono chiamati teorie di gran unificazione, o TGU. Detto nome è abbastanza ampolloso: le teorie risultanti né sono tanto grandi, né sono completamente unificatrici, perché non includono la gravità. Neanche sono realmente teorie complete, perché contengono un numero di parametri i cui valori non possono dedurrsi dalla teoria, ma devono essere scelti in modo che si adattino agli esperimenti. Nonostante, queste teorie possono costituire un primo passo verso una teoria completa e completamente unificatrice. L'idea basilare delle TGU è la seguente: come si menzionò sopra, l'interazione nucleare forte diventa meno intensa ad alte energie; al contrario, le forze elettromagnetiche e deboli, che non sono asintóticamente liberi, diventano più intense ad alte energie.  A determinata energia molto alta, chiamata energia della gran unificazione, queste tre forze dovrebbero avere tutte le stesse intensità e solo essere, pertanto, aspetti differenti di un'unica forza. Le TGU predice, inoltre, che a questa energia le differenti particelle materiali di porcospino 112, i *quarks* e gli elettroni, sarebbero come anche essenzialmente uguali, e si otterrebbe così un'altra unificazione.
Il valore dell'energia della gran unificazione non si conosce troppo bene, ma probabilmente dovrebbe essere come minimo di mille miliardi di GeV.  La generazione

attuale di acceleratori di particelle può fare urtare particelle con energie di approssimativamente 100 GeV, e sono progettate alcune macchine che eleverebbero queste energie a pochi di migliaia di GeV. Ma una macchina che fosse il sufficientemente potente come per accelerare particelle fino all'energia della gran unificazione dovrebbe essere tanto grande come il sistema solare, e sarebbe difficile che ottenesse finanziamento nella situazione economico presente. Perciò, è impossibile comprovare direttamente le teorie di gran unificazione nel laboratorio. Tuttavia, come nel caso della teoria unificatrice delle interazioni elettromagnetica e debole, esistono conseguenze a bassa energia della teoria che sì possono essere comprovate.

Il più interessante di esse è la predizione che i protoni che costituiscono gran parte della massa della materia ordinaria, possono decadere spontaneamente in particelle più leggere, tali come antielectrones. Questo è possibile perché nell'energia della gran unificazione non esiste nessuna differenza essenziale tra un *quark* ed un antielectrón. I tre *quarks* che formano il protone non ha normalmente l'energia necessaria per potere trasformarsi in antielectrones, ma molto occasionalmente alcuno di essi potrebbe acquisire sufficiente energia per realizzare la transizione, perché il principio di incertezza implica che l'energia dei *quarks dentro* il protone non può essere fissata con esattezza. Il protone decadrebbe allora. La probabilità che un *quark* guadagni l'energia sufficiente per quella transizione è tanto bassa che probabilmente dovremmo sperare come minimo un milione di miliardi di miliardi di anni, un 1 seguito di trenta zeri. Questo periodo è più allungo che il tempo trascorso dal *big bang* che sono approssimativamente alcuni cernie diecimila milioni di anni, un 1 seguito di dieci zeri. Così, si potrebbe pensare che la possibilità di disintegrazione spontanea del protone non può misurarsi sperimentalmente. Tuttavia, uno può aumentare le probabilità di scoprire una disintegrazione, osservando una gran quantità di materia con un numero elevato di protoni. , Se, per esempio, si osserva un numero di protoni uguale a 1 seguito di trenta ed un zeri per un periodo di un anno, si aspetterebbe, di accordo con la TGU più semplice, scoprire più di una disintegrazione del protone.

Diversi esperimenti di questo tipo sono stati portati a capo, ma nessuno ha prodotto un'evidenza definitiva sulla decadenza del protone o del neutrone. Un esperimento utilizzò otto mille tonnellate di acqua e fu realizzato nella miniera salata di Morton, in Ohio, per evitare che avessero luogo altri fenomeni, causati per raggi cosmici che potrebbero essere confusi con la disintegrazione di protoni. Dato che non si osservò nessuna disintegrazione di protoni durante l'esperimento, può calcolarsi che la vita mezza del protone deve essere maggiore di dieci miliardi di miliardi di anni, 1 con trenta ed un zeri. Quello che significa più tempo che la vita mezzo predicha per la teoria di gran unificazione più semplice, benché esistano teorie più elaborate nei che le vite mezzo predichas è maggiore. Esperimenti ancora più sensibili, includendo perfino maggiori quantità di materia, saranno necessari per comprovare dette teorie.

Benché sia molto difficile osservare la decadenza spontanea di protoni, può essere che la nostra propria esistenza sia una conseguenza del processo inverso, la produzione di protoni, o più semplicemente di *quarks, a partire da* una situazione iniziale nella che non ci fosse più che *quarks ed antiquarks* che è la maniera più naturale di immaginare che incominciò l'universo. La materia della Terra è formata principalmente per protoni e neutroni che a sua volta stanno formati per *quarks.* Non esistono antiprotoni o antineutrones, fatti di *antiquarks,* eccetto pochi che i fisici producono in grandi acceleratori di particelle. Abbiamo evidenza, attraverso i raggi cosmici, che la stessa cosa succede con la materia della nostra galassia: non ci sono antiprotoni o antineutrones, a parte pochi che si prodursi come pari partícula/antipartícula in collisioni di alte energie. Se ci fossero estese regioni di antimateria nella nostra galassia, spereremmo di osservare grandi quantità di radiazione proveniente dei limiti tra le regioni di materia ed antimateria dove molte particelle urterebbero col suo antipartículas, e si annichilirebbero tra sé, staccando radiazione di alta energia.

Non abbiamo evidenza diretta di se in altre galassie la materia è formata per protoni e neutroni o per antiprotoni ed antineutrones, ma deve essere o egli uno o la cosa altra: non può, c'essere un miscuglio dentro una stessa galassia, perché in quello caso osserveremmo di nuovo una gran quantità di radiazione prodotta per le annichilazioni. Pertanto, crediamo che tutte le galassie sono composte per *quarks invece di* per *antiquarks;* sembra inverosimile che alcuni galassie fossero di materia ed altre di antimateria.

Perché dovrebbe avere sacro più *quarks che antiquarks?* Perché non esiste lo stesso numero di essi? È certamente una fortuna per noi che le sue quantità siano disuguali perché, se fossero stati le stesse, quasi tutti i *quarks ed antiquarks si* sarebbero annichiliti tra sé nell'universo primitivo e sarebbe rimasto un universo pieno di radiazione, ma appena niente di materia. Non ci sarebbe stato allora né galassie, né getti, né pianeti sui quali la vita umana potesse svilupparsi. Fortunatamente, le teorie di gran unificazione possono proporzionarci una spiegazione di perché l'universo deve contenere ora più *quarks che antiquarks, perfino malgrado* incominciasse con lo stesso numero di essi. Come abbiamo visto, le TGU permette ai *quarks di* trasformarsi in antielectrones ad alte energie. Permettono anche il processo inverso, la conversione di *antiquarks* in elettroni, e di elettroni ed antielectrones in *antiquarks e quarks.* Ci fu un tempo, nei primi istanti dell'universo in che questo era tanto caldo che le energie delle particelle erano tanto alte che queste trasformazioni potevano avere luogo. Ma perché dovrebbe questo supporre l'esistenza di più *quarks che antiquarks?* La ragione è che le leggi della fisica non sono esattamente le stesse per particelle che ferma antipartículas.

Fino a 1956, si credeva che le leggi della fisica possedevano tre simmetrie indipendente chiamato C, P e T. La simmetria C significa che le leggi sono le stesse per particelle e ferma antipartículas. La simmetria P implica che le leggi sono le stesse per una situazione chiunque e ferma la sua immagine osservare, l'immagine osservare di una particella girando verso la destra è la stessa particella, girando verso la sinistra. La simmetria T significa che se si investisse la direzione del movimento di tutte le particelle ed antipartículas, il sistema girerebbe ad essere uguale a come fu prima: in altre parole, le leggi sono in avanti le stesse nelle direzioni ed all'indietro del tempo.

In 1956, due fisici nordamericani, Tsung-Dao Legge e Chen Ning Yang, suggerirono che la forza debole non possiede in realtà la simmetria P. In altre parole, la forza debole farebbe evolvere l'universo di un modo differente a come evolucioba l'immagine osservare dello stesso. Lo stesso aiño, una collega, Pigolare-Shiung Wu, provò che le predizioni di quegli erano corrette. Lo fece allineando i nuclei di atomi radioattivi in un campo magnetico, di tale modo che tutti girairan nella stessa direzione, e dimostrò che si liberavano più elettroni in una direzione che nell'altra. All'anno seguente, Legge e Yang ricevè il premio Nobel per la sua idea. Si trovò anche che la forza debole non possedeva cioè la simmetria C., un universo formato per antipartículas si comporterebbe in maniera differente al nostro. Tuttavia, sembrava che la forza debole sé possedeva la simmetria combinato CP. Cioè, l'universo evolverebbe così come la sua immagine osservare se, inoltre, ogni particella fosse cambiata per il suo antipartícula. Tuttavia, in 1964 due nordamericani più, J. W. Cronin e Val Fitch, scoprirono che neanche la simmetria CP si conservava nella disintegrazione di certe particelle chiamate locanda-K.  Cronin e Fitch riceverono finalmente, in 1980, il premio Nobel per il suo lavoro. , Si sono concessi molti premi per mostrare che l'universo non è tanto semplice come avevamo potuto pensare,

Esiste un teorema matematico secondo il quale qualunque teoria che ubbidisca alla meccanica quantica e la relatività deve possedere sempre la simmetria combinato CPT. In altre parole, l'universo dovrebbe comportare ugualmente se si rimpiazzassero le particelle per antipartículas, se si prendesse l'immagine osservare e si investisse la direzione del tempo. Ma Cronin e Fitch provarono che se si rimpiazzavano le particelle per antipartículas e si prendeva l'immagine osservare, ma non si investiva la direzione del tempo, allora l'universo non si comporterebbe ugualmente. Le leggi della fisica devono cambiare, pertanto, se si investe la direzione del tempo: non possiedono, dunque, la simmetria T.

Certamente, l'universo primitivo non possiede la simmetria T: quando il tempo avanza, l'universo si espande; se il tempo retrocedesse, l'universo si contrarsi. E dato che ci sono forze che non possiedono la simmetria T, potrebbe succedere che, come l'universo si espande, queste forze trasformassero più antielectrones in *quarks* che elettroni in *antiquarks.* Allora, espandendosi e raffreddarsi l'universo, gli *antiquarks si*

annichilirebbe coi *quarks,* ma, come ci sarebbe più *quarks che antiquarks, rimarrebbe* un piccolo eccesso di *quarks,* che sono quelli che costituiscono la materia che vediamo oggigiorno e della quale siamo fatti. Così, la nostra propria esistenza potrebbe essere vista come una conferma delle teorie di gran unificazione, benché solo fuori una conferma unicamente qualitativa; le incertezze sono tanto grandi che non può predirsi il numero di *quarks* che rimarrebbero dopo l'annichilazione, o perfino se sarebbero i *quarks* o gli *antiquarks* quelli che rimarrebbero. , Se ci fosse stato un eccesso di *antiquarks,* sarebbe la stessa cosa, perché avremmo richiamato *antiquarks* ai *quarks, e quarks* agli *antiquarks.*

Le teorie di gran unificazione non includono alla forza della gravità. Egli quale non importa troppo, perché la gravità è tanto debole che i suoi effetti possono essere normalmente sdegnati quando studiamo particelle o atomi. Tuttavia, il fatto che sia contemporaneamente da lontano portata e sempre attraente significa che i suoi effetti si sommano. Così, per un numero di particelle materiali sufficientemente grande, le forze gravitazionali possono dominare su tutte le altre. Per ciò, la gravità determina l'evoluzione dell'universo. Perfino per oggetti del volume di una stella, la forza attraente della gravità può dominare sul resto delle forze e fare che la stella collassi.  Il mio lavoro negli anni settanta si incentrò nei buchi neri che possono derivare da un collasso stellare ed in hs intensi campi gravitazionali esistenti ad intorno suo. Fu quello quello che ci condusse alle prime piste di come le teorie della meccanica quantica e della relatività generale potrebbero riferirsi tra sé: un barlume della forma che avrebbe una ventura teoria quantica della gravità.

# Capitolo 6

## I BUCHI NERI

Il termine *buco nero* ha un'origine molto recente. Fu coniato in 1969 per lo scienziato nordamericano John Wheeler come la descrizione grafica di un'idea che sale all'indietro un minimo di duecento anni, ad un'epoca in cui c'erano due teorie sulla luce: una, preferita per Newton che supponeva che la luce era composta per particelle, e l'altra che assuma che era formata per onde. Oggigiorno, sappiamo che entrambe le teorie sono corrette. Dovuto alla dualità onda / corpuscolo della meccanica quantica, la luce può essere considerata come un'onda e come una particella. Nella teoria che la luce era formata per onde, non rimaneva chiaro come risponderebbe questa davanti alla gravità. Ma se la luce era composta per particelle, potrebbe sperarsi che queste fossero colpite per la gravità dello stesso modo che lo sono le pallottole, i razzi ed i pianeti. Al principio, si pensava che le particelle di luce viaggiavano con infinita rapidità, in modo che la gravità non fosse stata capace di freneresti, ma la scoperta di Roemer che la luce viaggia ad una velocità finita, significò quello che la gravità potesse avere un effetto importante sulla luce.

Sotto questa supposizione, un professore universitario di Cambridge, John Michell, scrisse in 1783 un articolo nel *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* nel quale segnalava che una stella che fosse sufficientemente massiccia e compatta avrebbe un campo gravitazionale tanto intenso che la luce non potrebbe scappare: la luce emessa dalla superficie della stella sarebbe trascinata di giro verso il centro per l'attrazione gravitazionale della stella, prima che potesse arrivare molto lontano. Michell suggerì che potrebbe avere un gran numero di stelle di questo tipo. Malgrado non fossimo capaci di vederli perché la sua luce non ci raggiungerebbe, sé noteremmo la sua attrazione gravitazionale. Questi oggetti sono quelli che chiamiamo oggigiorno buchi neri, poiché questo è precisamente quello che sono: vuoti neri nello spazio. Un suggerimento simile fu realizzato pochi añ, s dopo per lo scienziato francese marchese di Laplace, sembra essere che indipendentemente di Michell. Risulta abbastanza interessante che Laplace includesse solo questa idea nella prima e le seconde edizioni del suo libro *Il sistema del mondo,* e non l'includesse nelle edizioni posteriori.  Magari decise che si trattava di un'idea spropositata. , Bisogna tenere anche in conto che la teoria corpuscolare della luce cadde in disuso durante il secolo xix; sembrava che tutto potesse spiegarsi con la teoria ondulatorio, e, di accordo con lei, non era chiaro se la luce sarebbe colpita per la gravità.
In realtà, non è realmente consistente trattare la luce come le pallottole nella teoria della gravità di Newton, perché la velocità della luce è fissa. , Una pallottola sparata verso l'alto dalla Terra si andrà frenando dovuto alla gravità e, finalmente, si fermerà e cadrà; un fotone, tuttavia, deve continuare verso l'alto con velocità costante. Come può

colpire allora la gravità newtoniana la luce?  Non apparve una teoria consistente di come la gravità colpisce la luce fino a che Einstein propose la relatività generale, in 1915. E perfino allora, dovette trascorrere molto tempo prima che si capissero le applicazioni della teoria circa le stelle massicce.

Per capire come potrebbe formarsi un buco nero, dobbiamo avere certe conoscenze circa il ciclo vitale di una stella. Una stella si forma quando una gran quantità di gas, principalmente idrogeno, comincia a collassare su sé stesso dovuto alla sua attrazione gravitazionale.  Come si contrarsi, il suo átotnos incomincia ad urtare tra sé, ogni volta con maggiore frequenza ed a maggiori velocità: il gas si riscalda. Col tempo, il gas sarà tanto caldo che quando gli atomi di idrogeno sbattano oramai non usciranno spaesati, ma si fonderanno formando elio. Il caldo staccato per la reazione che è come un'esplosione controllata di una bomba di idrogeno, fa che la stella brilli. Anche questo caldo addizionale aumenta la pressione del gas fino a che questa è sufficiente per equilibrare l'attrazione gravitazionale, ed il gas smette di contrarsisi. Somiglia in una certa misura ad un globo. Esiste un equilibrio tra la pressione dell'aria di dentro che tratta di fare che il globo si rimpinza, e la tensione della gomma che tratta di diminuire il volume del globo. Le stelle rimarranno stabili in questa forma per un lungo periodo, col caldo delle reazioni nucleari equilibrando l'attrazione gravitazionale. Finalmente, tuttavia, la stella consumerà tutto il suo idrogeno e gli altri combustibili nucleari. Paradossalmente, combustibile possiede quanto più all'inizio una stella, più pronto gli è finito. Questo si deve a che quanto più massiccia è l'è stella più calda deve stare per resistere l'attrazione gravitazionale, e, quanto ma scaldi sta, più rapidamente utilizza il suo combustibile.  Il nostro Sole ha approssimativamente probabilmente sufficiente combustibile per altri cinque mille milioni di anni, ma stelle più massicce possono spendere tutto il suo combustibile in solamente cento milioni di anni, molto meno che l'età dell'universo. Quando una stella rimane senza combustibile, incomincia a raffreddarsi e pertanto a contrarsisi. Quello che può succedergli a partire da quello momento si incominciò solo a capire alla fine degli anni venti.

In 1928, un studente graduato indio, Subrahmanyan Chandrasekhar, si imbarcò verso l'Inghilterra per studiare in Canibridge con l'astronomo britannico sir Arthur Eddington, un esperto in relatività generale. , Secondo alcuni fonti, un giornalista disse ad Eddington, all'inizio degli anni venti che aveva sentito che c'erano solo tre persone nel mondo che capissero la relatività generale. Eddington fece una pausa, e dopo replicò: Sto tentando di pensare chi la terza persona" è.

Durante il suo viaggio dall'India, Chandrasekhar calcolò la cosa grande che potrebbe arrivare ad essere una stella che fosse capace di sopportare la sua propria gravità, una volta che avrebbe speso tutto il suo combustibile. L'idea era la seguente: quando la stella si diminuisce in volume, le particelle materiali stanno molto vicino alcune di altre, e così, di accordo col principio di esclusione di Pauli, devono avere velocità molto

differenti. Questo fa che si allontanino alcune di altre, quello che tende ad espandere alla stella. Una stella può, pertanto, mantenersi con un raggio costante, dovuto ad un equilibrio tra l'attrazione della gravità e la repulsione che sorge dal principio di esclusione, così come prima la gravità era compensata per il caldo.

Chandrasekhar si rese conto, tuttavia, che esiste un limite alla repulsione che il principio di esclusione può proporzionare. La teoria della relatività limita la differenza massima tra le velocità delle particelle materiali della stella alla velocità della luce. Questo significa che quando la stella fosse sufficientemente densa, la repulsione dovuta all'inizio di esclusione sarebbe minore dell'attrazione della gravità. Chandrasekhar calcolò che una stella fredda di più di approssimativamente una volta e media la massa del Sole non sarebbe capace di sopportare la sua propria gravità. , A questa massa lo è conosciuto oggigiorno come il limite di Chandrasekhar, Una scoperta simile fu realizzata, quasi contemporaneamente, per lo scienziato russo Lev Davidovich Landau.

Tutto questo ha serie applicazioni nel destino ultimo delle stelle massicce.  Se una stella possiede una massa minore del limite di Chandrasekhar, può cessare finalmente di contrarsisi e stabilizzarsi in un possibile stato finale, come una stella "nana bianca", con un raggio di poche migliaia di chilometri ed una densità di decine di tonnellate per centimetro cubo. Una nana bianca si regge per la repulsione, dovuta all'inizio di esclusione tra gli elettroni della sua materia. Può osservarsi un gran numero di queste stelle nane bianche; una delle prime che si scoprirono fu una stella che sta girando attorno a Siriano, la stella più brillante nel cielo notturno.

Landau segnalò che esisteva altro possibile stato finale per una stella, anche con un massa limite di un o due volte la massa del Sole, ma molto più piccola perfino che una nana bianca. Queste stelle si manterrebbero all'inizio grazie alla repulsione dovuta di esclusione tra neutroni e protoni, invece di tra elettroni. Li fu chiamati per quel motivo stelle di neutroni.  Avrebbero approssimativamente un raggio di circa quindici chilometri ed una densità di decine di milioni di tonnellate per centimetro cubo. Nell'epoca in cui furono predichas, non c'era forma di potere osservarli; non furono scoperte realmente fino a molto dopo.

Stelle con masse superiori al limite di Chandrasekhar hanno, al contrario, un gran problema quando è finito loro il combustibile. In alcuni casi riescono a sfruttare, o glieli sistemano per staccarsi dalla sufficiente materia come per ridurre il suo peso sotto il limite ed evitare così un catastrofico collasso gravitazionale; ma è difficile pensare che questo succeda sempre, indipendentemente della cosa grande che sia la stella. Come potrebbe sapere la stella che doveva perdere peso?  E perfino se tutte le stelle glieli sistemassero per perdere la massa sufficiente come per evitare il collasso, che cosa succederebbe se si aggiungesse più massa ad una nana bianca o una stella di

neutroni, in modo che eccedesse il limite? Collasserebbe raggiungendo una densità infinita? Eddington si meravigliò tanto per questa conclusione che ricusò credersi il risultato di Chandrasekhar. Pensò che era semplicemente impossibile che una stella potesse collassare e trasformarsi in un punto. Questo fu il criterio della maggioranza degli scienziati: lo stesso Einstein scrisse un articolo nel quale sosteneva che le stelle non potrebbero avvilirsi fino ad avere un volume nullo. L'ostilità di altri scienziati, in questione di Eddington, il suo antico professore e principale autorità nella struttura delle stelle, persuase a Chandrasekhar ad abbandonare questa linea di lavoro e girare la sua attenzione verso altri problemi di astronomia, tali come il movimento dei gruppi di stelle. Tuttavia, quando gli fu concesso il premio Nobel in 1-983, fu, almeno in parte, per i suoi primi lavori sul massa limite delle stelle fredde.

Chandrasekhar aveva dimostrato che il principio di esclusione non potrebbe fermare il collasso di una stella più massiccia che il limite di Chandrasekhar, ma il problema di capire che cosa è quello che succederebbe a tale stella, di accordo con la relatività generale, fu risolto per la prima volta per un giovane nordamericano, Robert Oppenheimer, in 1939. Il suo risultato, tuttavia, suggeriva che non ci sarebbero conseguenze osservabili che potessero essere scoperte per un telescopio della sua epoca. Allora cominciò la seconda guerra mondiale ed il proprio Oppenheimer si vide incluso nel progetto della bomba atomica. Dopo la guerra, il problema del collasso gravitazionale fu ampiamente dimenticato, poiché la maggioranza degli scienziati si videro acchiappati nello studio di quello che succede a scala atomica e nucleare. Negli anni sessanta, nonostante, l'interesse per i problemi di gran scala dell'astronomia e la cosmologia fu resuscitata a causa dell'aumento nel numero e categoria delle osservazioni astronomiche, causato per l'applicazione della tecnologia moderna. Il lavoro di Oppenheimer fu allora riscoperto ed adottato per un certo numero di persone. L'immagine che abbiamo oggi del lavoro di Oppenheimer è la seguente: il campo gravitazionale della stella cambia le strade i raggi di luce nell'espaciotiempo- , rispetto a come fossero stati se la stella non fosse stata presente. I coni di luce che indicano le strade seguite nello spazio e nel tempo per scintillii luminosi emessi dai suoi vertici, si inclinano leggermente in dentro vicino alla superficie della stella. Questo può verta nella deviazione della luce, proveniente di stelle distanti, osservata per un'eclissi solare. Quando la stella si contrarsi, il campo gravitazionale nella sua superficie è più intenso ed i coni di luce si inclinano più in dentro. Questo fa più difficile della luce della stella scappi, e la luce si mostra più debole e più rossa per un osservatore lontano. Finalmente, quando la stella si è diminuita fino ad un certo radio critico, il campo gravitazionale nella superficie arriva ad essere tanto intenso che i coni di luce si inclinano tanto in dentro che la luce non può scappare oramai, figura 6.1. Di accordo con la teoria della relatività, niente può viaggiare più rapido della luce. Così se la luce non può scappare, neanche può farlo nessun altro oggetto -, tutto è trascinato per il campo gravitazionale.  Pertanto, si tiene un insieme di eventi, una regione dello spazio-tempo, da dove non può fuggire e raggiungere un osservatore lontano. Questa

regione è quella che oggigiorno chiamiamo un buco nero. La sua frontiera si denomina l'orizzonte di eventi e coincide con le strade dei raggi luminosi che stanno giusto per scappare dal buco nero, ma non l'ottengono.

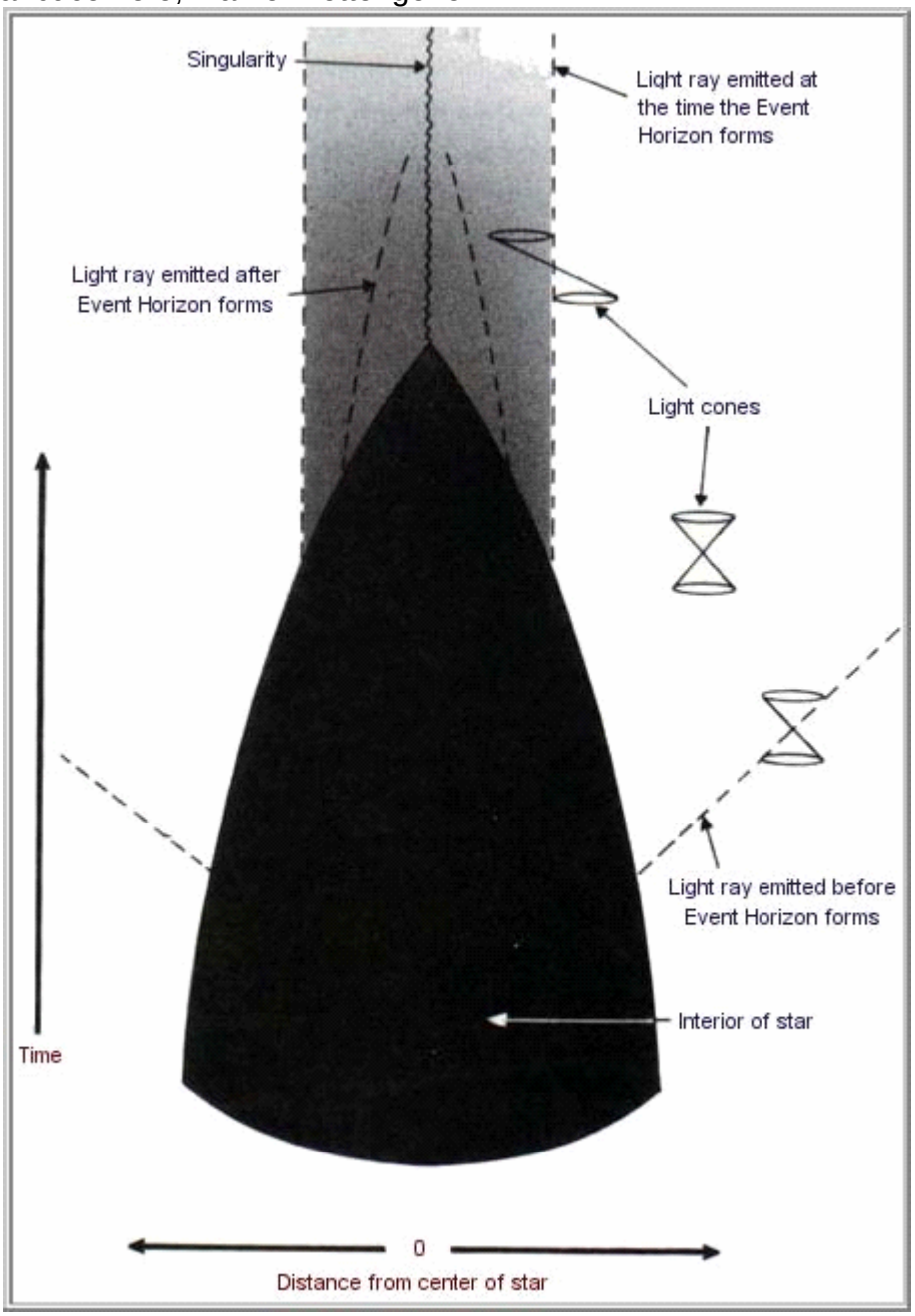

Singularity
Light ray emitted at the time the Event Horizon forms
Light ray emitted after Event Horizon forms
Light cones
Light ray emitted before Event Horizon forms
Interior of star
Time
0
Distance from center of star

Figura 6:1

Per capire quello che si vedrebbe se uno osservasse come collassa una stella per formare un buco nero, bisogna ricordare che nella teoria della relatività non esiste un tempo assoluto. Ogni osservatore ha la sua propria misura del tempo. Il tempo per qualcuno che stia in una stella sarà differente a quello di un'altra persona lontana, dovuto al campo gravitazionale di quella stella. Supponiamo che un intrepido astronauta che stesse situato nella superficie di una stella che collassa, e collassasse in dentro con lei, inviasse un segno ciascuno secondo, di accordo col suo orologio, alla

sua imbarcazione spaziale che gira in orbita attorno alla stella. Ad una certa ora secondo il suo orologio, diciamo che alle 11:00, la stella si diminuirebbe sotto la sua radio critica, allora il campo gravitazionale diventerebbe tanto intenso che niente potrebbe scappare ed i segni dell'astronauta non raggiungerebbero oramai l'imbarcazione. Come si avvicinassero le 11:00, i suoi compagni, che osservassero dall'imbarcazione, troverebbero sempre di più gli intervalli tra segni successivi lungo, benché detto effetto sarebbe molto piccolo prima delle 10:59:59. Dovrebbero solo aspettare poco più di un secondo tra il segno dell'astronauta delle 10:59:58 e quella che inviò quando nel suo orologio erano le 10:59:59; ma dovrebbero aspettare eternamente il segno delle 11:00. Le onde luminose emesse dalla superficie della stella tra le 10:59:59 e le 11:00, secondo l'orologio dell'astronauta, sarebbero estese durante un periodo infinito di tempo, visto dall'imbarcazione. L'intervallo di tempo tra l'arrivo di onde successive all'imbarcazione si farebbe sempre di più molto, la luce della stella arriverebbe per quel motivo sempre di più rossa e più debole. Alla fine, la stella sarebbe tanto oscura che non marcirebbe oramai verta dall'imbarcazione: tutto quello che rimarrebbe sarebbe un buco nero nello spazio. La stella continuerebbe, nonostante, esercitando la stessa forza gravitazionale sull'imbarcazione che seguirebbe in orbita attorno al buco nero.

Ma questa ipotesi non è completamente realistica, dovuto al problema seguente. La gravità diventa tanta più debole quanto più si allontana una dalla stella, la forza gravitazionale sui piedi del nostro intrepido astronauta sarebbe così sempre maggiore che ecceda la sua testa. Questa differenza delle forze allungherei il nostro astronauta come un *spaghetti* o lo romperei prima che la stella si fosse contrarsi fino al raggio critico in cui formati l'orizzonte di eventi! Nonostante, si crede che esistano oggetti maggiori nell'universo che possono soffrire anche un collasso gravitazionale, e produrre buchi neri. Un astronauta situato sopra ad uno di questi oggetti non sarebbe rotto prima che si formasse il buco nero. In realtà, egli non sentirebbe niente speciale quando raggiungesse il raggio critico, e potrebbe passare il punto di non ritorno senza notaio. Tuttavia, alle poche ore, finché la regione continuava collassando, la differenza tra le forze gravitazionali sulla sua testa e busta i suoi piedi si farebbe tanto intensa che di nuovo sarebbe rotto.
Il lavoro che Roger Penrose ed io facemmo tra 1965 e 1970 dimostrò che, di accordo con la relatività generale, deve avere una singolarità di densità e curvatura di espaciotiempo infiniti dentro un buco nero. La situazione è simile al *big bang all'inizio* del tempo, ma sarebbe il fine, invece del principio del tempo, per il corpo che collassa e per l'astronauta. In questa singolarità, tanto le leggi della scienza la nostra capacità di predire il futuro fallirebbero totalmente come. Nonostante, qualunque osservatore che rimanesse fuori del buco nero non sarebbe affettato per questa sentenza di capacità di predizione, perché né la luce né qualunque altro segno potrebbero raggiungergli dalla singolarità. Questo fatto notevole portò a Roger Penrose a proporre l'ipotesi della censura cosmica che potrebbe parafrasarsi come "Dio detesta una

singolarità nuda." In altre parole, le singolarità prodotte per un collasso gravitazionale succedono solo in posti, come i buchi neri dove stanno decentemente nascoste per mezzo di un orizzonte di eventi, per non essere vista da fosse. Strettamente, questo è quello che si conosce come l'ipotesi debole della censura cosmica: protegge gli osservatori che rimangono fuori del buco nero delle conseguenze della crisi di predizione che succede nella singolarità, ma non fa niente per il povero sfortunato astronauta che cade nel buco.

Esistono alcuni soluzioni delle equazioni della relatività generale nelle quali gli è possibile all'astronauta vedere una singolarità nuda: egli può evitare di sbattere con la singolarità e, invece di questo, cadere attraverso un "buco di verme", per uscire in un'altra regione dall'universo. Questo offrirebbe grandi possibilità di viaggiare nello spazio e nel tempo, benché sfortunatamente sembri essere che queste soluzioni sono altamente instabili; la minore perturbazione, come, per esempio, la presenza dell'astronauta, può cambiarli, in modo che l'astronauta non potrebbe vedere la singolarità fino a che sbattesse con lei, momento nel quale troverebbe il suo fine. In altre parole, la singolarità sarebbe sempre in sua futura e mai nel suo passato. La versione forte dell'ipotesi della censura cosmica ci dice che le singolarità staranno sempre, oppure interamente nel futuro, come le singolarità di collassi gravitazionali, oppure interamente nel passato, come il *big bang.* È molto probabile che si verifichi alcuna delle versioni della censura cosmica, perché vicino a singolarità nude può essere possibile viaggiare al passato. Benché questo fosse attraente per gli scrittori di fantascienza, significherebbe che le nostre vite non starebbero mai a salvo: qualcuno potrei ritornare al passato ed ammazzare tuo padre o tua madre prima che fossi stato concepito!

L'orizzonte di eventi, la frontiera della regione dell'espaciotiempo dalla che non è possibile scappare, agisce come una membrana unidirezionale attorno al buco nero: gli oggetti, tali come astronauti imprudenti, possono cadere nel buco nero attraverso l'orizzonte di eventi, ma niente può scappare dal buco nero attraverso l'orizzonte di eventi. , Ricordiamo che l'orizzonte di eventi è la strada nello spazio-tempo della luce che sta tentando di scappare dal buco nero, e niente può viaggiare più rapido della luce.  Uno potrebbe dire dell'orizzonte di eventi quello che il poeta Dante disse all'entrata dell'inferno: "Perdete ogni speranza oltrepassandomi." Qualunque cosa o persona che cade attraverso l'orizzonte di eventi pronto raggiungerà la regione di densità infinita ed il fine del tempo.

La relatività generale predice che gli oggetti pesanti in movimento produrranno l'emissione di onde gravitazionali, riccioli nella curvatura dello spazio che viaggiano alla velocità della luce. Dette onde sono simili alle onde luminose che sono riccioli del campo elettromagnetico, ma molto più difficili da scoprire.  Come la luce, si portano con sé energia degli oggetti che li emettono. Uno spererebbe, pertanto, che un sistema

di oggetti massicci si stabilizzasse finalmente in un stato stazionario, poiché l'energia di qualunque movimento si perderebbe nell'emissione di onde gravitazionali. , È sembrato a lasciare cadere un sughero nell'acqua: all'inizio si muove bruscamente verso l'alto e verso il basso, ma quando le onde si portano la sua energia, rimane finalmente in un stato stazionario.  Per esempio, il movimento della Terra nella sua orbita attorno al Sole produce onde gravitazionali. L'effetto della perdita di energia sarà cambiare l'orbita la Terra, in modo che gradualmente si andrà avvicinando sempre di più al sole; col tempo urterà con lui, e rimarrà in un stato stazionario. Il ritmo di perdita di energia nel caso della Terra ed il Sole è molto lento, approssimativamente la sufficienza per fare funzionare un piccolo scaldabagno elettrico. Questo significhi che la Terra tarderà circa mille miliardi di miliardi di anni a sbattere col Sole, per quello che non esistere un motivo immediato di preoccupazione! Il cambiamento nell'orbita della Terra è troppo piccolo per essere osservato, ma lo stesso effetto è stato scoperto durante gli ultimi anni nel sistema chiamato PSR 1913+16, PSR si riferisce a "premere", un tipo speciale di stella di neutroni che emette polsi regolari di onde di radio. Questo sistema contiene due stelle di neutroni girando un'attorno all'altra; l'energia che stanno perdendo, dovuto all'emissione di onde gravitazionali, fa loro girare tra sé in spirale.

Durante il collasso gravitazionale di una stella per formare un buco nero, i movimenti sarebbero molto più rapidi, per quello che il ritmo di emissione di energia sarebbe molto maggiore. Perciò, non tarderebbe troppo ad arrivare ad un stato stazionario. Che cosa sembrerebbe questo stato finale? Potrebbe supporrsi che dipenderebbe da tutte le complesse caratteristiche della stella della quale si è formato. Non solo di una massa e velocità di giro, ma anche delle differenti densità delle distinte parti in lei, e dei complicati movimenti dei gas nel suo interno. E se i buchi neri fossero tanto complicati come gli oggetti che collassano per formarli, potrebbe essere molto difficile realizzare qualunque predizione su buchi neri in generali.

In 1967, tuttavia, lo studio dei buchi neri fu rivoluzionato per Werner Israel, un scienziato canadese, che nacque a Berlino, crebbe in Sudafrica, ed ottenne il titolo di dottore in Irlanda. L'Israele dimostrò che, di accordo con la relatività generale, i buchi neri senza rotazione dovevano essere molto semplici; erano perfettamente sferici, il suo volume dipendeva solo dalla sua massa, e due buchi neri chiunque con la stessa massa sarebbero identici.  In realtà, potrebbero essere descritti per una soluzione particolare delle equazioni di Einstein, soluzione conosciuta da 1917, rinvenimento grazie a Karl Schwarzschild al poco tempo della scoperta della relatività generale.  Al principio, molta gente, compreso il proprio Israele, argomentò che dato che un buco nero doveva essere perfettamente sferico, potrebbe formarsi solo del collasso di un oggetto perfettamente sferico. Qualunque stella reale che non sarebbe mai *perfettamente* sferica, potrebbe collassare solo pertanto Lei formando una singolarità nuda.

Ebbe, tuttavia, un'interpretazione differente del risultato dell'Israele, difesa, in questione, per Roger Penrose e John Wheeler. Essi argomentarono che i rapidi movimenti inclusi nel collasso di una stella implicherebbero che le onde gravitazionali che staccasse le farebbero sempre più sferica, e ferma quando si fosse stanziato in un stato stazionario sarebbe perfettamente sferica. Di accordo con questo punto di vista, qualunque stella senza rotazione, indipendentemente della cosa complicata della sua forma e della sua struttura interna, finirebbe dopo un collasso gravitazionale per essere un buco nero perfettamente sferico il cui volume dipenderebbe unicamente della sua massa. Calcoli posteriori appoggiarono questo punto di vista che pronto fu adottato in maniera generale.

Il risultato dell'Israele si applicava solo al caso di buchi neri formati a partire da corpi senza rotazione. In 1963, Roy Kerr, un neozelandese, trovò un insieme di soluzioni alle equazioni della relatività generale che descrivevano buchi neri in rotazione. Questi buchi neri di "Kerr" girano ad un ritmo costante, ed il suo volume e forma dipendono solo dalla sua massa e della sua velocità di rotazione. Se la rotazione è nulla, il buco nero è perfettamente rotondo e la soluzione è identica a quella di Schwarzschild. Se la rotazione non è zero, il buco nero si deforma verso fosse vicino al suo equatore spavento come la Terra o il Sole si schiacciano nei poli dovuto alla sua rotazione, e quanto più rapida gita, più si deforma. In questo modo, estendendo il risultato dell'Israele per potere includere ai corpi in rotazione, si congetturò che qualunque corpo in rotazione che collassasse e formasse un buco nero, arriverebbe finalmente ad un stato stazionario descritto per la soluzione di Kerr.
In 1970, un collega ed il mio alunno di ricerca a Cambridge, Brandon Cárter, cedè il primo passo per la dimostrazione dell'anteriore congettura. Provò che, purché un buco nero ruotando in maniera stazionaria avesse un asse di simmetria, come una trottola, il suo volume e la sua forma dipenderebbero solo dalla sua massa e della velocità di rotazione. Dopo, in 1971, io dimostrai che qualunque buco nero ruotando in maniera stazionaria avrebbe sempre un asse di simmetria. Finalmente, in 1973, David Robinson, del Kings College di Londra, usò il risultato di Copricatena ed il mio per dimostrare che la congettura era corretta: detto buco nero deve essere veramente la soluzione di Kerr. Così, dopo un collasso gravitazionale, un buco nero deve collocarsi in un stato nel quale può ruotare, ma non può avere pulsazioni [cioè, aumenti e diminuzioni periodiche del suo volume].

Inoltre, il suo volume e forma dipenderanno solo dalla sua massa e velocità di rotazione, e non della natura del corpo che l'ha generato mediante il suo collasso. Questo risultato si fece conoscere con la frase: un buco nero non ha "capelli." Il teorema del "no esistenza di capelli" è di gran importanza pratica, perché restringe fortemente i tipi possibili di buchi neri. Possono farsi, pertanto, modelli dettagliati di oggetti che potrebbero contenere buchi neri, e paragonare le predizioni di questi modelli con le osservazioni. Implica anche che una gran quantità di informazione sul corpo collassato deve perdersi quando si forma il buco nero, perché dopo ciò, tutto

quella che può misurarsi del corpo è la massa e la velocità di rotazione. Il significato di tutto questo si vedrà nel prossimo capitolo.

I buchi neri sono un caso, tra pochi nella storia della scienza, nel quale la teoria si sviluppa in gran dettaglio come un modello matematico, prima che faggio nessuna evidenza attraverso le osservazioni che quella è corretta. In realtà, questo costituiva il principale argomento dei rivali dei buchi neri: come marcirebbe uno credere in oggetti il cui unica evidenza era calcoli basati nella dubbiosa teoria della relatività generale? In 1963, tuttavia, Maarten Schmidt, un astronomo dell'osservatorio Monti Colombaia della California, misurò lo spostamento verso il rosso di una debole oggetto somiglianza ad una stella, reddito nella direzione della fonte di onde di radio chiamata 3C273, cioè, fonte numero 273 del terzo catalogo di Cambridge di fonti di radio. Trovò che detto spostamento era troppo grande per essere causato per un campo gravitazionale: se fosse stato un spostamento verso il rosso di origine gravitazionale, l'oggetto dovrebbe essere stato tanto massiccio e tanto vicino a noi che avrebbe perturbato le orbite dei pianeti del sistema solare. Questo indusse a pensare che lo spostamento verso il rosso fu causato, invece di per la gravità, per l'espansione dell'universo, quello che, a sua volta, implicava che l'oggetto stava molto lontano. E per essere visibile a tanto gran distanza, l'oggetto dovrebbe essere molto brillante, dovrebbe, in altre parole, emettere un'enorme quantità di energia. L'unico meccanismo che si poteva pensare che producesse tali quantità di energia sembrava essere il collasso gravitazionale, non già di una stella, bensì di tutta una regione centrale di una galassia. Un certo numero di altri "oggetti cuasiestelares"- , *o quasars,* simili sono stati scoperti, tutti con grandi spostamenti verso il rosso. Ma tutti stanno troppo lontano e, pertanto, sono troppo difficili da osservare affinché possano proporzionare evidenze concludenti circa i buchi neri.

The brighter of the two stars near the center of the photograph is Cygnus X-1, which is thought to consist of a black hole and a normal star, orbiting around each other

Figura 6:2 Nuovi stimoli sull'esistenza di buchi neri arrivarono in 1967 con la scoperta, per un studente di ricerca di Cambridge, Jocelyn Bell, di oggetti celesti che emettevano polsi regolari di onde di radio. Al principio, Bell ed il suo direttore di tesi, Antony Hewish, pensarono che potrebbero avere stabilito contatto con una civiltà extraterrestre della galassia. In realtà, ricordo che, nel seminario nel che annunciarono la sua scoperta, denominarono alle prime quattro fonti contrario LGM 1-4, LGM riferendosi a "*Little Green Men"* [ometti verdi]. Alla fine, tuttavia, essi ed il resto di scienziati giunsero alla conclusione meno romantica di questi oggetti, ai che fu dato loro il nome di *pulsars,* erano in realtà stelle di neutroni in rotazione che emettevano polsi di onde di radio dovuto ad una complicata interazione tra i suoi campi magnetici e la materia di intorno suo. Furono brutte notizie per gli scrittori di *western* spaziali, ma molto promettenti per il piccolo gruppo dei che credevamo in buchi neri in quell'epoca: fu la prima evidenza positiva che le stelle di neutroni esistevano. Una stella di neutroni possiede un raggio di circa quindici chilometri, solo una piccola quantità di volte il raggio critico in cui una stella si trasforma in un buco nero.  Se una stella poteva collassare fino ad un volume tanto piccolo, non era logico sperare che altre stelle potessero collassare perfino a volumi minori e si trasformassero in buchi neri.

Come potremmo sperare che si scoprisse un buco nero, se per la sua propria definizione non emette nessuna luce? Potrebbe sembrare qualcosa di simile a cercare

un gatto nero in una cantina piena di carbone. Fortunatamente, c'è una maniera. Come John Michell segnalò nel suo articolo pioniere di 1783, un buco nero continua ad esercitare una forza gravitazionale sugli oggetti vicini. Gli astronomi hanno osservato molti sistemi nei quali due stelle girano in orbita un'attorno all'altra, attratte tra sé per la gravità. Osservano anche sistemi nei quali esiste solo una stella visibile che sta girando attorno a qualche compagno invisibile. Non si può, naturalmente, giungere alla conclusione che il compagno è un buco nero: potrebbe essere semplicemente una stella che è troppo debole per essere vista.  Tuttavia, alcuni di questi sistemi, come la chiamata Cygnus X-1, figura 6.2, sono anche fonti intense di raggi X. La migliore spiegazione di questo fenomeno è che si sta togliendo materia della superficie della stella visibile. Quando questa materia cade verso il compagno invisibile, sviluppa un movimento spirale, somiglianza al movimento dall'acqua quando si svuota una vasca da bagno, ed acquisisce una temperatura molto alta, emettendo raggi X, figura 6.3. Affinché questo meccanismo funzioni, l'oggetto invisibile deve essere piccolo, come una nana bianca, una stella di neutroni o un buco nero. A partire dall'orbita osservata della stella visibile, può determinarsi la massa più piccola possibile dell'oggetto invisibile. Nel caso di Cygnus X-1, questa è di circa sei volte la massa del Sole, quello che, di accordo col risultato di Chandrasekhar, è troppo grande affinché l'oggetto invisibile sia una nana bianca. È anche una massa troppo grande per essere una stella di neutroni. Sembra, pertanto, che si tratta di un buco nero.

Esistono altri modelli per spiegare Cygnus X-1 che non includono un buco nero, ma tutti sono abbastanza inverosimili. Un buco nero sembra essere l'unica spiegazione realmente naturale delle osservazioni. Nonostante ciò, ho pendenza una scommessa con Kip Thorne, dell'Istituto Tecnologico della California, che in realtà Cygnus X-1 non contiene nessun buco nero!  Si tratta di una specie di marca da bollo di sicura per me. Ho realizzato una gran quantità di lavori su buchi neri, e starebbe tutto perso se risultasse che i buchi neri non esistono. Ma in questo caso, avrebbe la consolazione di guadagnare la scommessa che mi darei ricevere la rivista *Privati Eye* per quattro anni. Se i buchi neri esistono, Kip otterrà una sottoscrizione alla rivista *Penthouse* per un anno. Quando facemmo la scommessa, in 1975, avevamo una certezza di un 80 per 100 che Cygnus era un buco nero. Ora, direbbe che la certezza è di un 95 per 100, ma la scommessa deve ancora dirimersi.

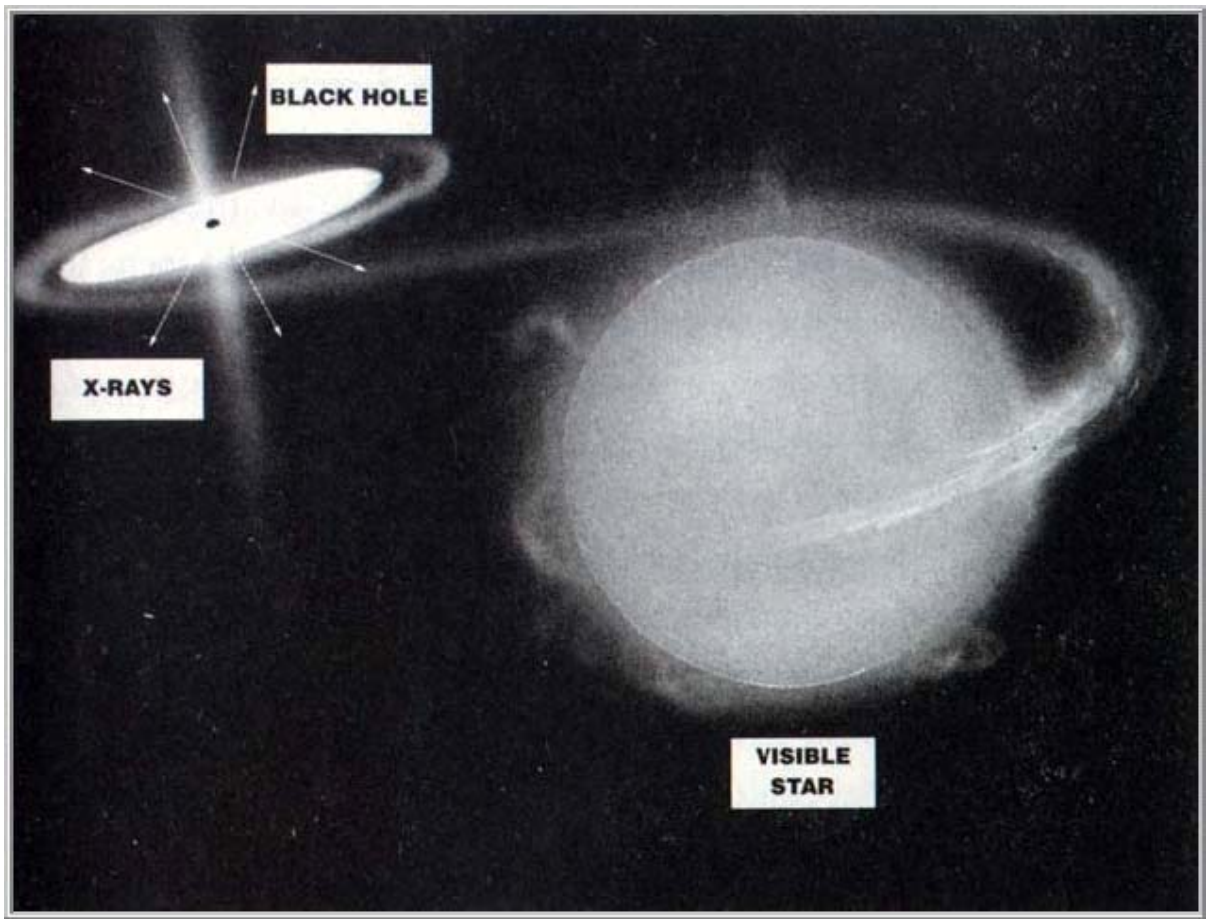



Figura 6:3

Attualmente abbiamo anche evidenze di altri buchi neri in sistemi come quello di Cygnus X-1 nella nostra galassia ed in due galassie vicine chiamate le Nuvole di Magellano. Il numero di buchi neri è, nonostante, quasi con ogni certezza moltissimo maggiore; nella lunga storia dell'universo, molte stelle hanno dovuto consumare tutto il suo combustibile nucleare, per quello che avranno dovuto collassare. Il numero di buchi neri potrebbe essere perfino maggiore che il numero di stelle visibili che registra solo un totale di circa cento mille milioni nella nostra galassia. L'attrazione gravitazionale extra di un numero tanto grande di buchi neri potrebbe spiegare perché la nostra galassia gira alla velocità con che lo fa: la massa delle stelle visibili è insufficiente per spiegarlo. Abbiamo anche alcuno evidenza che esiste un buco nero molto maggiore, con una massa di approssimativamente cento mille volte quella del Sole, nel centro della nostra galassia. I
stelle della galassia che si avvicinino troppo a questo buco nero saranno fatte schegge per la differenza tra le forze gravitazionali negli estremi più lontano e vicino. I suoi resti, ed il gas che è scopato delle altre stelle, cadranno verso il buco nero. Come nel caso di Cygnus X-1, il gas si muoverà in dentro in spirale e si riscalderà, benché non tanto quanto in quello caso. Non si riscalderà quanto basta come per emettere raggi X, ma

sì che potrebbe essere una spiegazione della fonte enormemente compatta di onde di radio e di raggi infrarossi che si osserva nel centro della galassia.

Si pensa che buchi neri simili, ma più grandi, con masse di circa cento milioni di volte quella del Sole, esistono nel centro dei *quasars.* La materia che cade in detti buchi nero supermasivos proporzionerebbe l'unica fonte di potenza il sufficientemente grande come per spiegare le enormi quantità di energia che questi oggetti emettono. Quando la materia cadesse in spirale verso il buco nero, farebbe girare a questo nella stessa direzione, facendo che sviluppasse un campo magnetico sembrato a quello dalla Terra. Particelle di alte energie si genererebbero vicino al buco nero a causa della materia che cadrebbe. Il campo magnetico sarebbe tanto intenso che potrebbe mettere a fuoco a quelle particelle in getti iniettati verso fosse, durante l'asse di rotazione del buco nero, nelle direzioni del suo poli nord e sud. Tali getti sono davvero osservati in un certo numero di galassie e *quasars.*

Può considerarsi anche la possibilità che possa avere buchi neri con masse molto minori di quella del Sole. Questi buchi neri non potrebbero formarsi per un collasso gravitazionale, poiché le sue masse stanno sotto il limite di Chandrasekhar: stelle di tanto poca massa possono reggersi a loro stesse contro la forza della gravità, perfino quando abbiano consumato tutto il suo combustibile nucleare. Buchi neri di poca massa potrebbero formarsi solo se la materia fosse compressa ad enorme densità per grandi pressioni esterne. Tali condizioni potrebbero succedere in una bomba di idrogeno grande: il fisico John Wheeler calcolò una volta che se si prendesse tutta l'acqua pesante di tutti gli oceani del mondo, potrebbe costruirsi una bomba di idrogeno che comprimerebbe tanto la materia nel centro che si formerebbe un buco nero. , Naturalmente, non rimarrebbe nessuno per poterlo osservare, Una possibilità più pratica è che tali buchi di poca massa potrebbero aversi formati nelle alte temperature e pressioni dell'universo in una fase molto iniziale. I buchi neri si sarebbero formati unicamente se inizialmente l'universo non fosse stato liscio ed uniforme, perché solo una piccola regione che fosse più densa della calza potrebbe essere compressa di questa maniera per formare un buco nero.  Ma si sa che sono dovuti esistere alcuni irregolarità, perché altrimenti, oggigiorno, la materia nell'universo ancora sarebbe distribuita perfettamente uniforme, invece di essere attorniata formando stelle e galassie.

Quello che le irregolarità richieste per spiegare l'esistenza delle stelle e delle galassie sarebbero stati sufficienti, o no, per la formazione di un numero significativo di buchi neri "primitivi", dipende chiaramente dalle condizioni dell'universo primitivo. Così, se potessimo determinare quanti buchi neri primitivi esistono attualmente, impareremmo un'enorme quantità di cose sulle prime tappe dell'universo. Buchi neri primitivi con masse di più di mille milioni di tonnellate, la massa di una montagna grande, potrebbero essere solo scoperti per la sua influenza gravitazionale sulla materia

visibile, o nell'espansione dell'universo. Tuttavia, come impareremo nel seguente capitolo, i buchi neri non sono realmente neri dopo tutto: irradiano come un corpo caldo, e quanto più piccoli sono più irradiano. Così, paradossalmente, i buchi neri più piccoli potrebbero derivare realmente più facili da scoprire che i grandi!

# Capitolo 7

## I BUCHI NERI NON SONO TANTO NERI

Prima di 1970, la mia ricerca sulla relatività generale si era concentrata fondamentalmente sulla questione di se ha avuto o non unisca singolarità nel *big bang.* Tuttavia, una notte di novembre di quell'anno, giostro un po' dopo la nascita di mia figlia Lucy, cominciai a pensare ai buchi neri mentre mi coricavo. La mia malattia trasforma questa operazione in un processo abbastanza lento, in modo che aveva moltissimo tempo. In quell'epoca, non esisteva una definizione precisa di che punti dello spazio-tempo cadono dentro un buco nero e quali cadono fuori. Aveva discusso già con Roger Penrose l'idea di definire un buco nero come l'insieme di eventi dai che non è possibile esulare da una gran distanza, definizione che è il generalmente accettata attualmente.  Significa che la frontiera del buco nero, l'orizzonte di eventi, è formato per le strade nello spazio-tempo dei raggi di luce che non riescono giustamente a scappare dal buco nero, e che si muovono eternamente su quella frontiera, figura
7. l. È sembrato qualcosa a correre fuggendo dalla polizia e riuscire a mantenersi davanti, ma non essere capace di fuggire senza lasciare rastrello.

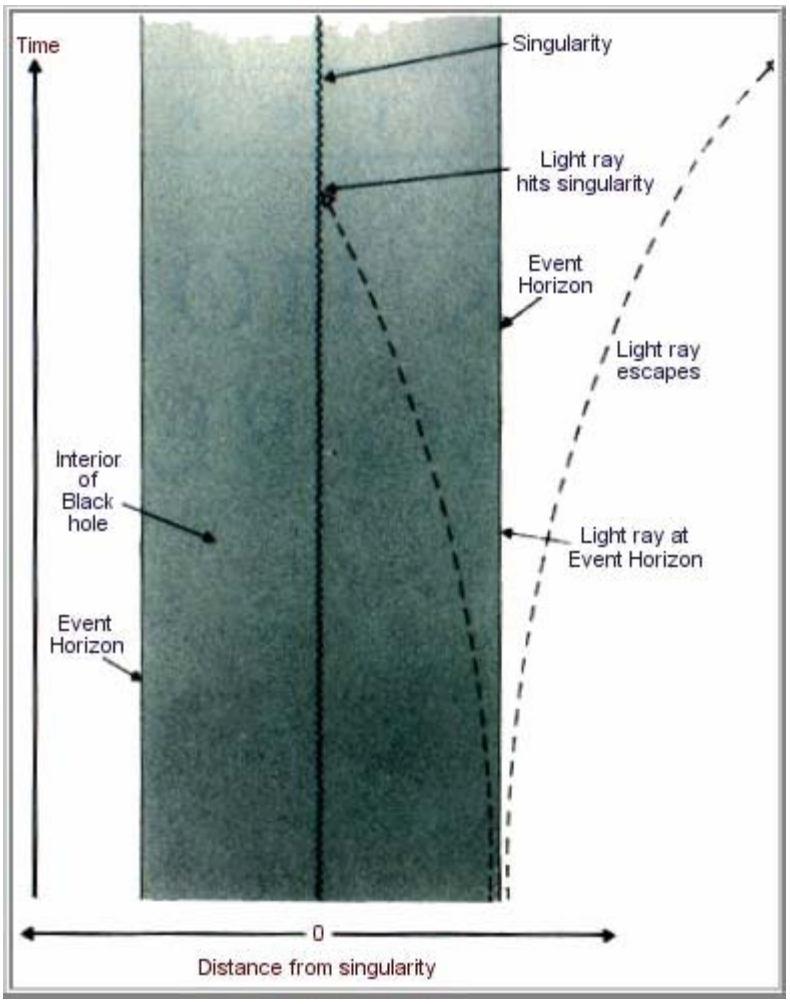
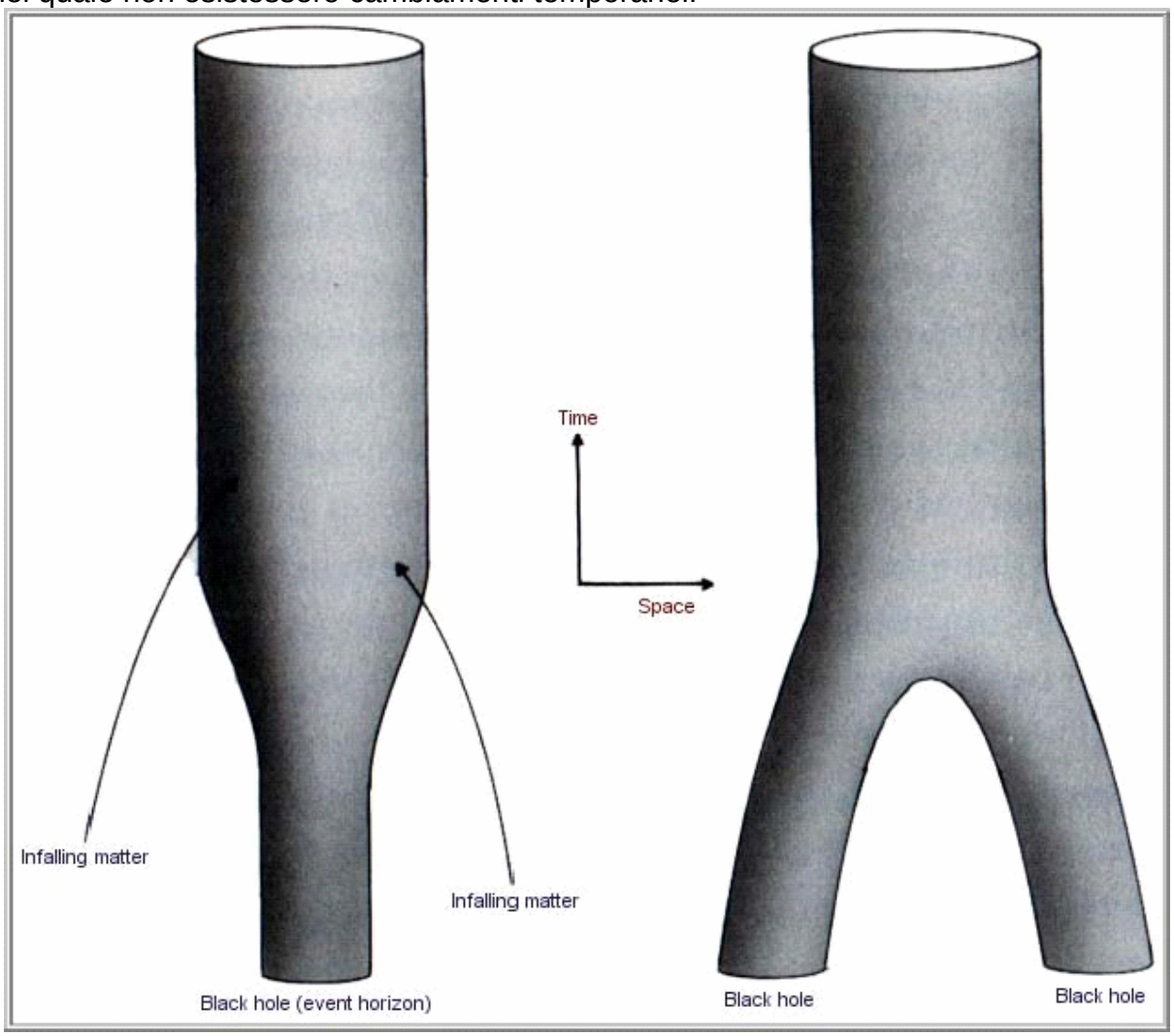



Figura 7:1

Improvvisamente, compresi che le strade di questi raggi di luce non potrebbero avvicinarsi mai tra sé. Se lo facessero, dovrebbero finire per sbattere. Sarebbe come trovarsi con qualche altro individuo fuggendo dalla polizia in senso contrario: ambedue sarebbero fermati! (0, in questo caso  i raggi di luce cadrebbero nel buco nero.  Ma se questi raggi luminosi fossero assorbiti per il buco nero, non sarebbero potuti stare allora nella frontiera del buco nero. Così, le strade dei raggi luminosi nell'orizzonte di eventi devono muoversi sempre o paralleli o allontanandosi tra sé. Un altro modo di vedere questo è immaginando che l'orizzonte di eventi, la frontiera del buco nero, è come il profilo di un'ombra, l'ombra della morte imminente. Se uno si fissa nell'ombra proiettata per una fonte molto lontana, come il Sole, vedrà che i raggi di luce del profilo si non stanno avvicinando tra sé.

Se i raggi di luce che formano l'orizzonte di eventi, la frontiera del buco nero, non possono avvicinarsi mai tra essi, l'area dell'orizzonte di eventi marcirebbe o rimanere costante 0 aumentare col tempo, ma non potrebbe diminuire mai, perché questo implicherebbe che almeno alcuni dei raggi di luce della frontiera dovrebbero avvicinarsi

tra sé. In realtà, l'area aumenterà purché qualcosa di materia o radiazione cada nel buco nero, figura 7.2. 0 se due buchi neri sbattono e rimangono uniti formando un unico buco nero, l'area dell'orizzonte di eventi del buco nero fine sarà maggiore o come la somma delle aree degli orizzonti di eventi dei buchi neri originale, figura 7.3. Questa proprietà di non diminuzione dell'area dell'orizzonte di eventi produce una restrizione importante dei comportamenti possibili dei buchi neri. Mi eccitò tanta est scoperta che quasi non potei dormire quella notte. Al giorno dopo, telefonai a Roger Penrose. Egli fu di accordo con me. Credo che, in realtà, egli era già cosciente di questa proprietà dell'area. Tuttavia, egli stava usando una definizione di buco nero leggermente differente.  Non si era reso conto che le frontiere dei buchi neri, di accordo con le due definizioni, sarebbero le stesse, per quello che lo sarebbero anche le sue aree rispettive, purché il buco nero si fosse stabilizzato in un stato stazionario nel quale non esistessero cambiamenti temporanei.




Raffiguri 7:2 & 7:3

Il comportamento non decrescente dell'area di un buco nero ricordava il comportamento di una quantità fisica chiamata entropia che misura il grado di

disordine di un sistema. È una questione di esperienza giornaliera che il disordine tende ad aumentare, se le cose si abbandonano a loro stesse. , Uno deve solo smettere di riparare cose nella casa per comprovarlo, Può crearsi ordine a partire dal disordine, per esempio, uno può dipingere la casa, ma questo richiede un consumo di sforzo o energia, e pertanto diminuisce la quantità di energia ordinata ottenibile.

Un enunciato preciso di questa idea si conosce come seconda legge della termodinamica. Dice che l'entropia di un sistema isolato aumenta sempre, e che quando due sistemi si uniscono, l'entropia del sistema combinato è maggiore che la somma delle entropías dei sistemi individuali. Consideriamo, a modo di esempio, un sistema di molecole di gas in una scatola. Le molecole possono immaginarsi come piccole palle da biliardo sbattendo continuamente tra sé e con le pareti della scatola. Quanto maggiore sia la temperatura del gas, con maggiore rapidità si muoveranno le particelle e, pertanto, con maggiore frequenza ed intensità sbatteranno contro le pareti della scatola, e maggiore pressione verso fosse eserciteranno. Supponiamo che le molecole sono inizialmente confinate nella parte sinistra della scatola mediante una parete separadora.  Se si toglie detta parete, le molecole tenderanno ad espandersi ed ad occupare le due metà di b scatola. In qualche istante posteriore, tutte esse potrebbero stare, per caso, nella parte destra, o, di nuovo, nella metà sinistra, ma è eccessivamente più probabile che ci sia un numero approssimativamente uguale di molecole in ognuna delle due metà. Tale stato è meno ordinato, o più disordinato che lo stato originale nel quale tutte le molecole stavano in una metà. Si dice, per quel motivo, che l'entropia del gas ha aumentato.  In maniera analoga, supponiamo che si incomincia con due scatole, una che contiene molecole di ossigeno e le altre molecole di azoti. Se si uniscono le scatole e si tolgono le pareti separadoras, le molecole di ossigeno e di azoti incominceranno a mischiarsi. Trascorso un certo tempo, lo stato più probabile sarà un miscuglio abbastanza uniforme di molecole di ossigeno ed azoti in entrambe le scatole. Questo stato sarà meno ordinato, e pertanto avrà più entropia che lo stato iniziale delle due scatole separate.

La seconda legge della termodinamica ha un *status* qualcosa di differente a quello delle restanti leggi della scienza, come quella della gravità di Newton per citare un esempio, perché non si verifica sempre, benché sì nell'immensa maggioranza dei casi. La probabilità che tutte le molecole di gas di nostra prima scatola si trovino in una metà, passato un certo tempo, è di molti milioni di milioni di fronte ad uno, ma può succedere. Tuttavia, se uno ha un buco nero, sembra esistere una maniera più facile da violare la seconda legge: semplicemente lanciando al buco nera materia con gran quantità di entropia, come, per esempio, una scatola di gas. L'entropia totale della materia fosse del buco nero diminuirà. Ancora si potrebbe dire, naturalmente, che l'entropia totale, includendo l'entropia dentro il buco nero, non ha diminuito, ma, dato che non c'è forma di guardare dentro il buco nero, non possiamo sapere quanta entropia ha la materia di dentro. Sarebbe allora interessante che avesse alcuno caratteristica del buco nero a partire dalla quale gli osservatori, fosse di lui, potessero sapere la sua entropia, e che questa aumentasse purché cadesse nel buco nera

materia portatrice di entropia. Seguendo la scoperta descritta prima, l'area dell'orizzonte di eventi aumenta purché cada materia in un buco nero, un studente di ricerca di Princeton, chiamato Jacob Bekenstein, suggerì che l'area dell'orizzonte di eventi era una misura dell'entropia del buco nero. Quando materia portatrice di entropia cade in un buco nero, l'area del suo orizzonte di eventi aumenta, di tale modo che la somma dell'entropia della materia fosse dei buchi neri e dell'area degli orizzonti non diminuisce mai.
Questo suggerimento sembrava evitare quello che la seconda legge della termodinamica fosse violata nella maggioranza delle situazioni. Tuttavia, c'era un errore fatale. Se un buco nero avesse entropia, allora anche dovrebbe avere una temperatura. Ma un corpo ad una temperatura particolare deve emettere radiazione ad un certo ritmo. È una questione di esperienza comune che se si riscalda un attizzatoio nel fuoco si mette rosso incandescente ed emette radiazione; anche i corpi a temperature più basse emettono radiazione, benché normalmente non si apprezzi perché la quantità è abbastanza piccola. Si richiede questa radiazione per evitare che si violi la seconda legge. Perciò, i buchi neri dovrebbero emettere radiazione. Ma per la sua propria definizione, i buchi neri sono oggetti che si suppone che non emettono niente. Sembra, pertanto, che l'area di un buco nero non potrebbe associarsi con la sua entropia. In 1972, scrissi un articolo con Brandon Cárter ed un collega nordamericano, Jim Bardeen, nel quale segnaliamo che benché ci fossero molte somiglianze tra entropia ed area dell'orizzonte di eventi, esisteva apparentemente molto male questa difficoltà. Devo ammettere che scrivendo questo articolo era animato, in parte, per la mia irritazione contro Bekenstein chi, come io credevo, aveva abusato della mia scoperta dell'aumento dell'area dell'orizzonte di eventi. Ma alla fine risultò che egli stava essenzialmente nella cosa certa, benché di una maniera che egli non aveva potuto aspettare.

In settembre di 1973, durante un mia visita a Mosca, discussi circa buchi neri con due distaccati esperti sovietici, Yakov Zeldovich ed Alexander Starobinsky. Mi convinsero che, di accordo col principio di incertezza della meccanica quantica, i buchi neri in rotazione dovrebbero creare ed emettere particelle. Accettai i suoi argomenti per motivi fisici, ma non mi piacque il modo matematico come avevano calcolato l'emissione. Per questo, intrapresi il compito di ideare un trattamento matematico meglio che descrissi in un seminario informale ad Oxford, alla fine di novembre di 1973. In quello momento, non aveva realizzato ancora i calcoli per trovare quanto si emetterebbe realmente. Sperava di scoprire esattamente la radiazione che Zeldovich e Starobinsky avevano predetto per i buchi neri in rotazione. Tuttavia, quando feci il calcolo, trovai, per la mia sorpresa e rabbia, che perfino i buchi neri senza rotazione dovrebbero creare particelle ad un ritmo stazionario. Al principio pensai che questa emissione indicava che uno degli avvicinamenti che aveva usato non era valido. Aveva paura che se Bekenstein veniva a sapere questo, l'usasse come un nuovo argomento per appoggiare la sua idea circa l'entropia dei buchi neri che non mi piaceva ancora. Nonostante, quanto più

pensava a ciò, più mi somigliavo che gli avvicinamenti dovessero essere davvero adeguati. Ma quello che alla fine mi convinse che l'emissione era reale fu che lo spettro delle particelle emesse era esattamente lo stesso che emetterebbe un corpo caldo, e che il buco nero emetteva esattamente particelle al ritmo corretto, per evitare, violazioni della seconda legge.
Da allora i calcoli si sono ripetuti di diverse maniere per altre persone. Tutte esse confermano che un buco nero dovrebbe emettere particelle e radiazione come se fosse un corpo caldo con una temperatura che dipende solo dalla massa del buco nero: quanto maggiore sia la massa, tanto minorenne sarà la temperatura.

Come è possibile che un buco nero sembri emettere particelle quando sappiamo che niente può scappare di dentro il suo orizzonte di eventi? La risposta che la teoria quantica ci dà, è che le particelle non provengono dal buco nero, bensì dello spazio "vuoto" giusto fuori dell'orizzonte di eventi del buco nero. Possiamo capire questo della seguente maniera: quello che consideriamo lo spazio "vuoto" non può essere completamente vuoto, perché questo significherebbe che tutti i campi, tali come il gravitazionale o l'elettromagnetico, dovrebbero essere esattamente zero. Tuttavia, il valore di un campo e la sua velocità di cambiamento col tempo sono come la posizione e la velocità di una particella: il principio di incertezza implica che quanto con maggiore precisione si conosce una di quelle due grandezze, con minore precisione può sapersi l'altra. Così, nello spazio vuoto, il campo non può essere fisso con valore zero esattamente, perché allora avrebbe contemporaneamente un valore preciso, zero, ed una velocità di cambiamento precisa, anche zero. Deve avere una certa quantità minima dovuto all'incertezza, o fluttuazioni quantiche, del valore del campo. Uno può immaginarsi queste fluttuazioni come partorisci di particelle di luce o di gravità che appaiono giunte in un istante determinato, si separano, e dopo tornano ad unire, annichilendosi tra sé. Queste particelle sono particelle virtuali, come le particelle che trasmettono la forza gravitazionale del Sole: al contrario che le particelle reali, non possono essere osservate direttamente con un rivelatore di particelle. Nonostante, i suoi effetti indiretti, tali come piccoli cambiamenti nelle energie delle orbite elettroniche negli atomi, possono essere dosati e concordano con le predizioni teoriche con un alto grado di precisione. Anche il principio di incertezza predice che ci saranno paia simili di particelle materiali virtuali, come elettroni o *quarks.* In questo caso, tuttavia, un membro del paio sarà un particella e l'altro un'antipartícula, le antipartículas della luce e della gravità sono le stesse che le particelle.

Come l'energia non può essere creata del niente, uno dei componenti dia un pari partícula/antipartícula avrà energia positiva e l'altra energia negativa. Quello che ha energia negativa è condannato ad essere una particella virtuale di vita molto breve, perché le particelle reali hanno sempre energia positiva in situazioni normali. Deve, pertanto, cercare il suo compagno ed annichilirsi con lei. Ma una particella reale, vicino ad un corpo massiccio, ha meno energia che se stesse lontano, perché si avrebbe

bisogno di energia per allontanarla contro l'attrazione gravitazionale da quello corpo. Normalmente, l'energia della particella continua ancora ad essere positiva, ma il campo gravitazionale dentro un buco nero è tanto intenso che una particella reale può avere perfino lì energia negativa.  È, pertanto, possibile, per la particella virtuale con energia negativa, se è presente un buco nero, cadere nel buco nero e trasformarsi in una particella o antipartícula reale. In questo caso, non deve oramai annichilirsi col suo compagno. Il suo abbandonato compagno può cadere egualmente nel buco nero. 0, avendo energia positiva, può scappare anche dalle vicinanze del buco nero come una particella o antipartícula reale, figura 7.4. Per un osservatore lontano, sembrerà essere stato emessa dal buco nero.  Quanto più piccolo sia il buco nero, minorenne sarà la distanza che la particella con energia negativa dovrà percorrere prima di trasformarsi in una particella reale e, quindi, maggiori saranno la velocità di emissione e la temperatura apparente del buco nero.

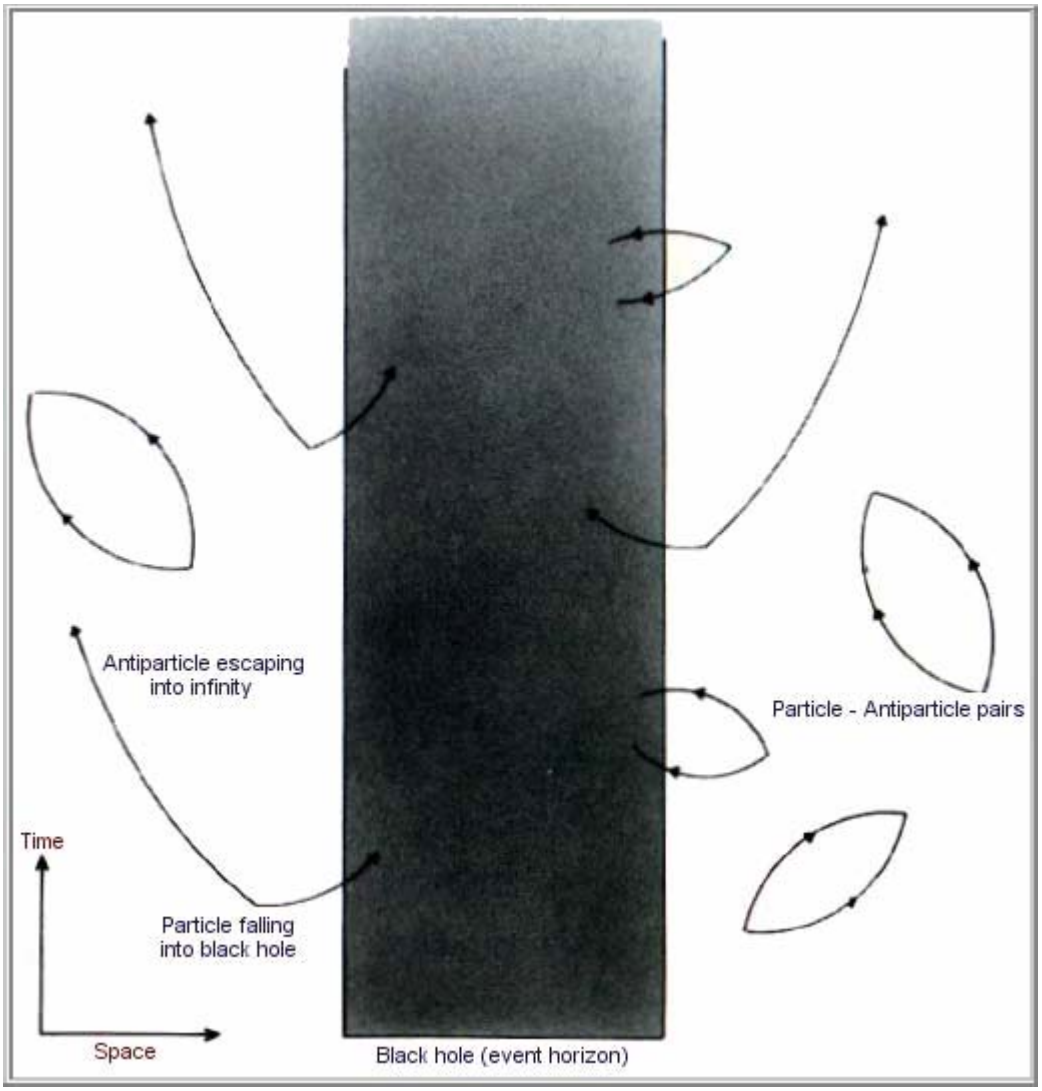



Figura 7:4

L'energia positiva della radiazione emessa sarebbe compensata per un flusso verso il buco nero di particelle con energia negativa. Per l'equazione di Einstein E=mc2 dove E

è l'energia, m, la massa e *c,* la velocità della luce, sappiamo che l'energia è proporzionale alla massa. Un flusso di energia negativa verso il buco nero riduce, pertanto, la sua massa. Come il buco nero perde massa, l'area del suo orizzonte di eventi diminuisce, ma la conseguente diminuzione di entropia del buco nero è compensata in eccesso per l'entropia della radiazione emessa, e, così, la seconda legge non è mai violata.

Inoltre, quanto più piccola sia la massa del buco nero, tanto maggiore sarà la sua temperatura. Così, quando il buco nero perde massa, la sua temperatura e la sua velocità di emissione aumentano e, pertanto, perde massa con più rapidità. Quello che succede quando la massa del buco nero si fa, col tempo, eccessivamente piccola non è chiaro, ma la supposizione più ragionevole è che sparirebbe completamente in una tremenda esplosione finale di radiazione, equivalente all'esplosione di milioni di bombe H.

Un buco nero con una massa di poche volte la massa del Sole avrebbe una temperatura di solo dieci milionesimo di grado al di sopra dello zero assoluto. Questo è molto meno che la temperatura della radiazione di microonde che riempie l'universo, approssimativamente uguale a 2.7' al di sopra dello zero assoluto, per quello che tali buchi neri emetterebbero perfino meno di quello che assorbono. Se l'universo è destinato a continuare espandendosi per sempre, la temperatura della radiazione di microonde diminuirà e col tempo sarà minore di quella di un buco nero di quelle caratteristiche che allora incomincerebbe a perdere massa.  Ma, perfino in quello caso, la sua temperatura sarebbe tanto piccola che si avrebbero bisogno approssimativamente di un milione di miliardi di miliardi di miliardi di miliardi di miliardi di anni, un 1 con sessanta sei zeri dietro, affinché si volatilizzasse completamente. Questo periodo è molto più lungo dell'età dell'universo che è solo di circa dieci o venti mille milioni di anni, un 1 o 2 con dieci zeri dietro. Al contrario, come si menzionò nel capitolo 6, potrebbero esistere buchi neri primitivi con una massa molto più piccola che si formarono dovuto al collasso di irregolarità nelle tappe iniziali dell'universo. Questi buchi neri avrebbero una maggiore temperatura ed emetterebbero radiazione ad un ritmo molto maggiore.  Un buco nero primitivo con una massa iniziale di mille milioni di tonnellate avrebbe una vita mezza approssimativamente uguale all'età dell'universo. I buchi neri primitivi con masse iniziali minorenni dell'anteriore si sarebbe volatilizzato già completamente, ma quelli con masse leggermente superiori starebbero emettendo ancora radiazione in forma di raggi X e raggi gamma. I raggi X e la raggi gamma sono come le onde luminose, ma con una longitudine di onda più breve.
Appena tali buchi meritano l'appellativo di *nero:* sono realmente bersagli incandescenti ed emettono energia ad un ritmo di circa diecimila megawatt.

Un buco nero di quelle caratteristiche potrebbe fare funzionare dieci grandi centrali elettriche, se potessimo approfittare della sua potenza.  Nonostante, questo sarebbe

abbastanza difficile: il buco nero avrei una massa come quella di una montagna compressa in meno di una miliardesimo di centimetro, il volume del nucleo di un atomo! Se si tenesse uno di questi buchi neri nella superficie della Terra, non ci sarebbe forma di ottenere che non affondasse nel suolo ed arrivasse al centro della Terra. Oscillerebbe attraverso la Terra, in uno ed un altro senso, fino a che alla fine si fermerebbe nel centro. Così, l'unico posto per collocare questo buco nero, in modo che potesse utilizzarsi l'energia che emette, sarebbe in orbita attorno alla Terra, e l'unica forma in che potrebbe essere messogli in orbita sarebbe attraendolo per mezzo di una gran massa sistemata davanti a lui, simile alla carota di fronte dell'asino.  Questo non sembra una proposta troppo pratica, almeno in un futuro immediato.

Ma benché non possiamo approfittare dell'emissione di questi buchi neri primitivi, quali sono le nostre possibilità di osservarli? Potremmo cercare la raggi gamma che emettono durante la maggior parte della sua esistenza.  Malgrado la radiazione della maggior parte di essi fosse molto debole, perché starebbero molto lontano, il totale di tutti essi sé che potrebbe essere detestabile. Possiamo osservare questo fondo di raggi gamma: la figura 7.5 dimostrazione come differisce l'intensità osservata con la predicha a differenti frequenze, il numero di onde per secondo. Tuttavia, questo fondo di radiazione sarebbe potuto essere generato, e probabilmente lo fu, per altri processi distinti a quelli dei buchi neri primitivi.  La linea a tratti della figura 7.5 dimostrazione come dovrebbe variare l'intensità con la frequenza per raggi gamma prodotti per buchi neri primitivi, se avesse, per termine mezzo, 300 per anno luce cubo.  Si può dire, pertanto, che le osservazioni del fondo di raggi gamma non proporzionano nessuna evidenza *positiva* dell'esistenza di buchi neri primitivi, ma ci dicono che non può avere più di 300 per ogni anno luce cubo nell'universo.  Questo limite implica che i buchi neri primitivi potrebbero costituire come molto la milionesimo parte della materia dell'universo.

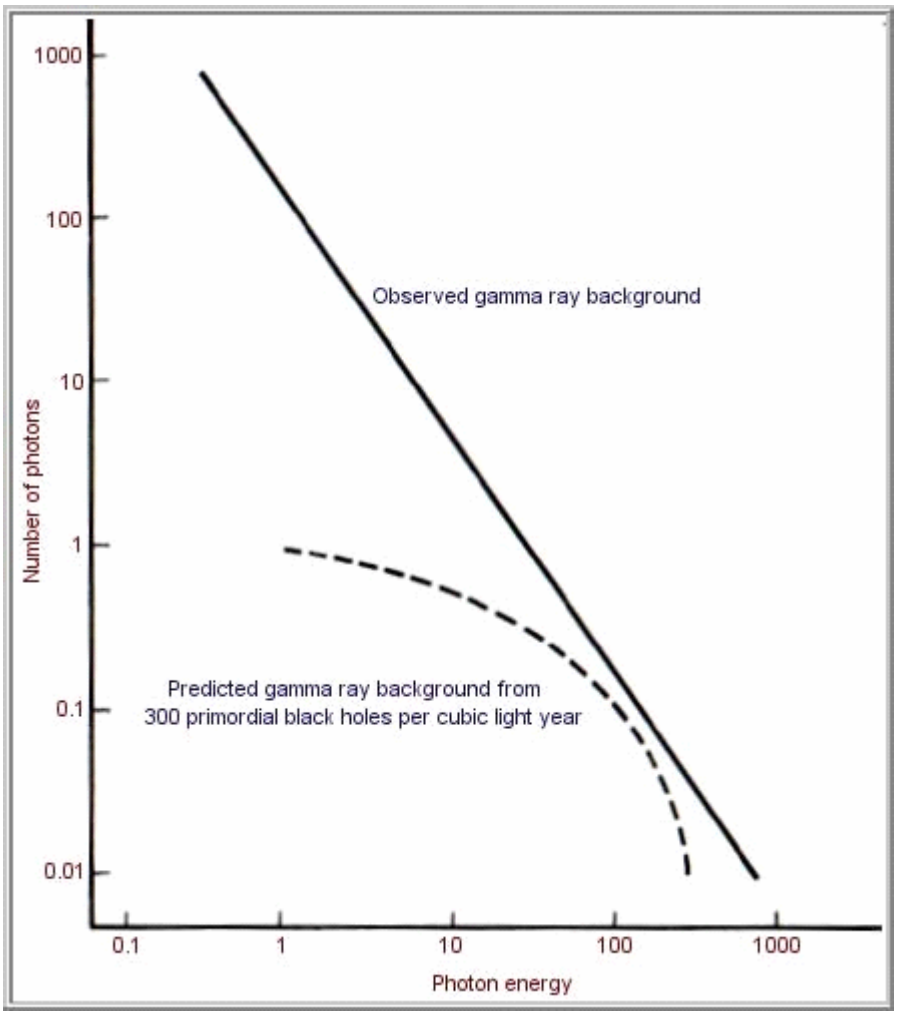



Figura 7:5

All'essere i buchi neri primitivi così scarsi, sembrerebbe improbabile che esistesse sufficientemente uno egli vicino a noi come per potere essere osservato come una fonte individuale di raggi gamma. Tuttavia, dato che la gravità attrarrebbe ai buchi neri verso la materia, questi dovrebbero stare, in generale, intorno e dentro le galassie. Così, malgrado il fondo di raggi gamma ci dica che non può avere, per termine mezzo, più di 300 buchi neri primitivi per anno luce cubo, non ci dice niente di quanti può avere nella nostra propria galassia. Se avesse, per esempio, un milione di volte più che per termine mezzo, allora il buco nero più vicino starebbe ad una distanza di circa mille milioni di chilometri, o, approssimativamente, alla stessa distanza che Plutone, il più lontano dei pianeti conosciuti. A questa distanza, sarebbe ancora molto difficile scoprire l'emissione stazionaria di un buco nero, perfino benché avesse una potenza di diecimila megawatt. Per assicurare che si osserva un buco nero primitivo dovrebbero scoprire vari quanti di raggi gamma provenienti della stessa direzione in un spazio di tempo ragionevole, per esempio, una settimana. Di un'altra forma, potrebbero essere semplicemente parte della radiazione di fondo. Ma il principio di quantificazione di Planck ci dice che ogni quanto di raggi gamma ha un'energia

molto alta, perché la raggi gamma possiedono una frequenza molto elevata, in modo che non si necessiterebbero molti quanti per irradiare una potenza di diecimila megawatt. Per osservare i pochi quanti che arriverebbero da una distanza come quella di Plutone si richiederebbe un rivelatore di raggi gamma maggiore che chiunque del quale si sono costruiti fino ad ora. Inoltre, il rivelatore dovrebbe stare nello spazio, perché la raggi gamma non possono oltrepassare l'atmosfera.

Naturalmente che se un buco nero tanto vicino come Plutone arrivasse alla fine della sua esistenza e sfruttasse, sarebbe facile scoprire l'esplosione finale di radiazione. Ma se il buco nero sta emettendo durante gli ultimi dieci o venti mille milioni di anni, la probabilità che arrivi alla fine della sua vita durante i prossimi anni invece di che l'avrebbe fatto fa milioni di anni, o che lo facesse dentro milioni di anni, è abbastanza piccola. Così per potere avere una probabilità ragionevole di vedere un'esplosione prima che la borsa di studio di ricerca ci ci finisca, dovremo trovare un modo di scoprire qualunque esplosione che succeda a meno di un anno luce.  Si dovrebbe ancora disporre di un gran rivelatore di raggi gamma per potere osservare vari quanti di raggi gamma provenienti dell'esplosione. In questo caso, tuttavia, non sarebbe necessario determinare che tutti i quanti vengono dalla stessa direzione: sarebbe sufficiente osservare che tutti arrivano in un intervallo di tempo molto breve, per essere ragionevolmente sicuri che tutti provengono dalla stessa esplosione.

Un rivelatore di raggi gamma capace di trovare buchi neri primitivi è l'atmosfera terrestre intera. , In ogni modo, è improbabile che siamo capaci di costruire un rivelatore maggiore, Quando un quanto di raggi gamma di alta energia sbatte con gli atomi della nostra atmosfera creda pari di elettroni e positroni (antielectrones . Quando questi sbattono con altri atomi, credano a sua volta più pari di elettroni e positroni, in modo che si ottiene quello che si chiama una pioggia di elettroni. Il risultato è una forma di luce conosciuta come radiazione di Cherenkov. Si possono, pertanto, scoprire impatti di raggi gamma cercando scintillii luminosi nel cielo notturno. Ovviamente che esistono diversità di fenomeni distinti, come raggi di temporali e riflessioni della luce solare in satelliti orbitali e rifiuti spaziali che danno anche posto a scintillii nel cielo. Gli impatti di raggi gamma possono distinguersi di questi effetti osservando gli scintillii in due o più posti ampiamente separati.  Una ricerca di questo tipo fu portata a capo per due cientfflcos di Dublino, Neil Porter e Trevor Weekes, che usarono telescopi in Arizona. Trovarono un certo numero di scintillii, ma nessuno che potesse essere associato, senza posto a dubbi, ad impatti di raggi gamma provenienti di buchi neri primitivi.
Benché la ricerca di buchi neri primitivi risulti negativa, come sembra essere che può succedere, ci darà ancora una preziosa informazione circa i primi istanti dell'universo. Se l'universo primitivo fosse stato caotico o irregolare, o se la pressione della materia fosse stata bassa, si sarebbe aspettato che si prodursi molti più buchi neri primitivi che il limite già stabilito per le nostre osservazioni della radiazione di fondo di raggi gamma.

Solo il fatto che l'universo primitivo fosse molto regolare ed uniforme, con un'alta pressione, può spiegare l'assenza di una quantità osservabile di buchi neri primitivi.

L'idea dell'esistenza di radiazione proveniente di buchi neri fu il primo esempio di una predizione che dipendeva da un modo essenziale delle due grandi teorie del nostro secolo, la relatività generale e la meccanica quantica. Al principio, alzò una forte opposizione perché mutò il punto di vista esistente: "come può un buco nero emettere qualcosa?." Quando annunciai per la prima volta i risultati dei miei calcoli in una conferenza data nel laboratorio Rutherford-Appleton, nelle vicinanze di Oxford, fui ricevuto con gran incredulità. Alla fine della chiacchierata, il presidente della sessione, John G. Taylor del Kings College di Londra, affermò che i miei risultati non avevano nessun senso. Perfino scrisse un articolo in questa linea. Nonostante, alla fine, la maggior parte degli scienziati, compreso John Taylor, sono giunti alla conclusione che i buchi neri devono irradiare come corpi caldi, se tutte le nostre altre idee circa la relatività generale e della meccanica quantica sono corrette. Così, malgrado non siamo riusciti ancora a trovare un buco nero primitivo, esiste un consenso abbastanza generale che se lo trovassimo dovrebbe stare emettendo una gran quantità di raggi gamma e di raggi X.

L'esistenza di radiazione proveniente di buchi neri sembra implicare che il collasso gravitazionale non è tanto definitivo ed irreversibile come si credè. Se un astronauta cade in un buco nero, la massa di questo aumenterà, ma col tempo l'energia equivalente a quella massa sarà restituita all'universo in forma di radiazione. Così, in un certo senso, l'astronauta sarà "riciclato." Sarei, in qualche modo, un tipo irrilevante di immortalità, perché qualunque sensazione personale di tempo dell'astronauta avrebbe finito, quasi sicuro, all'essere questo rotto dentro il buco nero! Perfino i tipi di particelle che fossero emessi finalmente per il buco nero sarebbero in generale differenti di quelli che formavano parte dell'astronauta: l'unica caratteristica dell'astronauta che sopravvivrebbe sarebbe la sua massa o energia.

Gli avvicinamenti che usai per derivare l'emissione di buchi neri devono essere validi quando il buco nero ha una massa maggiore che una frazione di un grammo. Nonostante ciò, falliranno alla fine della vita del buco nero quando la sua massa diventi molto piccola. Il risultato più probabile sembra che fosse che semplicemente il buco nero sparirà, almeno della nostra regione dell'universo, portandosi con lui all'astronauta e qualunque singolarità che potesse contenere, se c'è in realtà alcuna. Questa fu la prima indicazione che la meccanica quantica potrebbe eliminare le singolarità predichas per la teoria della relatività. Tuttavia, i metodi che altri scienziati ed io utilizzavamo in 1974 non erano capaci di rispondere a questioni come quella di se dovevano esistere singolarità nella gravità quantica; a partire da 1975, cominciai a sviluppare un avvicinamento più potente alla gravità quantica basata nell'idea da Feynman di somma sulle storie possibili. Le risposte che questo avvicinamento

suggerisce per l'origine e destino dell'universo e dei suoi contenuti, tali come astronauti, saranno descritti nei due capitoli seguenti. Si vedrà che, benché il principio di incertezza stabilisca limitazioni sulla precisione delle nostre predizioni, potrebbe eliminare contemporaneamente l'incapacità di predizione di carattere fondamentale che succede in una singolarità dello spazio-tempo.

# Capitolo 8

## L'ORIGINE ED IL DESTINO DELL'UNIVERSO

La teoria della relatività generale di Einstein, da sola, predisse che l'espaciotiempo - cominciò nella singolarità del *big bang* e che andrebbe verso un fine, bene nella singolarità del *big crunch* ['gran scricchiolio', 'implosione'], se l'universo intero Lei collassasse di nuovo, oppure in una singolarità dentro un buco nero, se una regione locale, come una stella, collassi. Qualunque materia che cadesse nel buco sarebbe distrutta nella singolarità, e solamente l'effetto gravitazionale della sua massa continuerebbe sentendosi fuori. D'altra parte, tenendo in conto gli effetti quantici sembra che la massa o energia della materia dovrebbe essere restituito finalmente al resto dell'universo, e che il buco nero, insieme a qualunque singolarità dentro lui, si volatilizzerebbe ed infine sparirebbe. Marcirebbe la meccanica quantica avere un effetto altrettanto spettacolare sulle singolarità del *big bang* e del *big crunch?* Che cosa succede realmente durante le tappe molto precoci o molto tardive dell'universo, quando i campi gravitazionali sono tanto forti che gli effetti quantici non possono essere ignorati? Ha in realtà l'universo un principio ed un fine? E se è così, come sono?

Durante la decade dei settanta mi dedicai principalmente a studiare i buchi neri, ma in 1981 il mio interesse per questioni circa l'origine ed il destino dell'universo si svegliò di nuovo quando assistei ad una conferenza su cosmologia, organizzata per i gesuiti nel Vaticano. La Chiesa cattolica aveva commesso un grave errore con Galileo, quando tentò di basare cattedra su una questione di scienza, dichiarando che il Sole si muoveva attorno alla Terra. Ora, secoli dopo, aveva deciso di invitare ad un gruppo di esperti affinché la consigliasse su cosmologia. Alla fine della conferenza, ai partecipanti ci fu concesso un'udienza col Papa. Ci disse che stava bene studiare l'evoluzione dell'universo dopo il *big bang,* ma che non dovevamo indagare nel *big bang* stesso, perché si trattava del momento della Creazione e pertanto dell'opera di Dio. Mi rallegrai allora che non conoscesse il tema della chiacchierata che io avevo appena dato nella conferenza: la possibilità che lo spazio-tempo fosse finito ma non avesse nessuna frontiera, quello che significherebbe che non ci fu nessun principio, nessun momento di Creazione. Io non avevo nessun desiderio di condividere il destino di Galileo con chi mi sento fortemente concorde in parte per la coincidenza di essere nato esattamente 300 anni dopo la sua morte!
Per spiegare le idee che io ed altre persone abbiamo avuto la meccanica quantica può colpire l'origine ed il destino dell'universo circa come, è necessario capire in primo luogo la storia generalmente accettata dell'universo, di accordo con se lo conosce come modello del *big bang "*caldo." Questo modello suppone che l'universo si descrive

mediante un modello di Friedmann, giusto dallo stesso *big bang.* In tali modelli si dimostra che, come l'universo si espande, ogni materia o radiazione esistente in lui si raffredda. , Quando l'universo duplica il suo volume, la sua temperatura si diminuisce alla metà. Dato che la temperatura è semplicemente una misura dell'energia, o della velocità media delle particelle, quello raffreddamento dell'universo avrebbe un effetto della maggiore importanza sulla materia esistente dentro lui. A temperature molto alte, le particelle si starebbero muovendo tanto in fretta che potrebbero vincere qualunque attrazione tra esse dovuta a forze nucleari o elettromagnetiche, ma man mano che Lei producesse il raffreddamento si aspetterebbe che le particelle Lei attraesse alcune ad altre fino a cominciare a raggrupparsi giunte. Inoltre, perfino i tipi di particelle che esistesse nell'universo dipenderebbero dalla temperatura. A temperature sufficientemente alte, le particelle avrebbero tanta energia che ogni volta che urtasse si prodursi molte pari partícula/antipartícula differenti, e benché alcune di queste particelle si annichilissero sbattendo con antipartículas, si prodursi più rapidamente di quello che potrebbero annichilirsi. A temperature più basse, tuttavia, quando le particelle che urtasse avessero meno energia, i paia partícula/antipartícula si prodursi meno rapidamente, e l'annichilazione sarebbe più rapida della produzione.

Giusto nello stesso *big bang, si* pensa che l'universo ebbe un volume nullo, e pertanto che fu infinitamente caldo. Ma, come l'universo si espandeva, la temperatura della radiazione diminuiva. Un secondo dopo il *big bang,* la temperatura sarebbe discesa circa diecimila milioni di gradi. Quello rappresenta alcune mille volte la temperatura nel centro del Sole, ma temperature tanto alte come quella si capiscono nelle esplosioni delle bombe H. In quello momento, l'universo avrebbe contenuto fondamentalmente fotoni, elettroni, neutrini, particelle eccessivamente leggere che sono colpite unicamente per la forza debole e per la gravità, ed il suo antipartículas, insieme ad alcuni protoni e neutroni. Man mano che l'universo continuava espandendosi e la temperatura discendendo, il ritmo al quale i paia electrón/antielectrón stava essendo prodotto nelle collisioni sarebbe disceso sotto il ritmo al quale stavano essendo distrutti per annichilazione. Così, la maggior parte degli elettroni e gli antielectrones si sarebbe annichilito mutuamente per produrre più fotoni, rimanendo solamente pochi elettroni. I neutrini e gli antineutrinos, tuttavia, non si sarebbero annichiliti alcuni ad altri, perché queste particelle interagiscono tra esse e con altre particelle molto debolmente. Pertanto, ancora oggi dovrebbero stare per di là. Se potesse osservarli, ciò proporzionerebbe una buona prova di questa immagine di una precoce tappa molto calda dell'universo. Disgraziatamente, le sue energie sarebbero attualmente troppo basse affinché i potesse osservare direttamente. Nonostante, se i neutrini non hanno massa, ma hanno una massa propria piccola, come in 1981 suggerì non un esperimento russo confermato, potremmo essere capaci di scoprirli indirettamente: i neutrini potrebbero essere una forma di "materia oscura", come quella menzionata anteriormente, con sufficiente attrazione gravitazionale come per fermare l'espansione dell'universo e provocare che Lei collassasse di nuovo.

Circa cento secondi dopo il *big bang,* la temperatura sarebbe discesa a mille milioni di gradi che è la temperatura all'interno delle stelle più calde. A questi temperatura protoni e neutroni non avrebbero già energia sufficiente per vincere forte l'attrazione dell'interazione nucleare, ed avrebbero cominciato ad accordarsi insieme per produrre i nuclei di atomi di deuterio (idrogeno pesante che contengono un protone ed un neutrone. I nuclei di deuterio si sarebbero accordati allora con più protoni e neutroni per formare nuclei di elio che contengono due protoni e due neutroni, ed anche piccole quantità di un paio di elementi più pesanti, litio e berilio. Può calcolarsi che nel modello di *big bang* caldo, attorno ad una quarta parte dei protoni ed i neutroni si sarebbe convertito in nuclei di elio, insieme ad una piccola quantità di idrogeno pesante e di altri elementi. I restanti neutroni si sarebbero disintegrati in protoni che sono i nuclei degli atomi di idrogeno ordinari.

Questa immagine di una tappa precoce calda dell'universo le propose per la prima volta lo scientifico George Gamow in un famoso articolo scritto in 1948 con un suo alunno, Ralph Alpher. Gamow aveva abbastanza senso dell'umorismo; persuase lo scienziato nucleare Hans Bethe affinché aggiungesse il suo nome all'articolo e così fare che la lista di autori fosse "Alpher, Bethe, Gamow", come quelle tre primi lettere dell'alfabeto greco: alfa, beta, gamma. Particolarmente appropriato per un articolo sul principio dell'universo! In quell'articolo, fecero la notevole predizione che la radiazione, in forma di fotoni, proveniente dalle tappe precoci molto calde dell'universo deve rimanere ancora oggi, ma con la sua temperatura ridotta a solo pochi gradi al di sopra dello zero assoluto, -273 OC. Fu questa radiazione quella che Penzias e Wilson trovarono in 1965. Nell'epoca in che Alpher, Bethe e Gamow scrissero il suo articolo, non si sapeva molto circa le reazioni nucleari di protoni e neutroni. Le predizioni fatte sulle proporzioni dei distinti elementi nell'universo primitivo erano, pertanto, abbastanza inesatte, ma quelli calcoli sono stati ripetuti alla luce di una conoscenza migliore delle reazioni nucleari, ed ora coincidono molto bene con quello che osserviamo. Risulta, inoltre, molto difficile da spiegare di qualunque altra maniera perché c'è tanto elio nell'universo. Stiamo, quindi, abbastanza sicuri che abbiamo l'immagine corretta, almeno a partire da approssimativamente un secondo dopo il *big bang.*

Solamente alcune ore dopo il *big bang* la produzione di elio e di altri elementi si sarebbe trattenuto. Dopo, durante il seguente milione di anni, più o meno, l'universo avrebbe continuato espandendosi, senza che succedesse molto più. Finalmente, una volta che la temperatura sarebbe discesa a poche migliaia di gradi e gli elettroni ed i nuclei non avesse già sufficiente energia per vincere l'attrazione elettromagnetica tra essi, questi avrebbero cominciato a combinare si ferma formare atomi. In complesso l'universo avrebbe continuato ad espandersi e raffreddandosi, ma in regioni che fosse leggermente più dense che la calza l'espansione sarebbe stata ritardata per l'attrazione gravitazionale extra. Questa avrebbe fermato finalmente l'espansione in

alcuni regioni, ed avrebbe provocato che cominciasse a collassare di nuovo. Come stesse collassando, la tirata gravitazionale dovuto alla materia fosse di queste regioni potrebbe incominciare a farloro girare leggermente. Man mano che la regione colapsante Lei facesse più piccolo, darebbe rovesciate su sé stessa sempre di più in fretta, esattamente della stessa forma che i pattinatori dando rovesciate sul ghiaccio girano più in fretta quando restringono le sue braccia. Finalmente, quando la regione diventasse sufficientemente piccola, starebbe girando sufficientemente in fretta il come per compensare l'attrazione della gravità, ed in questo modo sarebbero nate le galassie girevoli in forma di disco. Altre regioni che non avrebbero acquisito rotazione per qualche caso, si trasformerebbero in oggetti ovali chiamate galassie ellittiche. In queste, la regione smetterebbe di collassare perché parti individuali della galassia starebbero girando di forma stabile attorno al suo centro, benché la galassia nel suo insieme non avesse rotazione.

Man mano che il tempo trascorresse, il gas di idrogeno ed elio delle galassie si disgregherebbe in nuvole più piccole che comincerebbero a collassare dovuto alla sua propria gravità. Come Lei contraesse e gli atomi dentro esse urtassero alcuni con altri, la temperatura del gas aumenterebbe, fino a che finalmente fosse il sufficientemente caldo come per iniziare reazioni di fusione nucleare. Queste reazioni trasformerebbero l'idrogeno in più elio, ed il caldo staccato aumenterebbe la pressione, quello che impedirebbe alle nuvole di continuare a contrarsisi. Quelle nuvole rimarrebbero stabili in quello stato per molto tempo, come getti del tipo del nostro Sole, bruciando idrogeno per formare elio ed irradiando l'energia risultante in forma di caldo e luce. Le stelle con una massa maggiore dovrebbero essere più caldi per compensare la sua attrazione gravitazionale più intensa, quello che farebbe che le reazioni di fusione nucleare Lei producesse molto più in fretta, tanto che consumerebbero in una volta il suo idrogeno tanto breve come cento milioni di anni. Si contrarsi allora leggermente, e, riscaldandosi più, incomincerebbero a trasformare l'elio in elementi più pesanti come carbonio od ossigeno. Questo, tuttavia, non libererebbe molta più energia, in modo che si prodursi una crisi, come si descrisse nel capitolo sui buchi neri. Di seguito quello che succederebbe non sta completamente chiaro, ma sembra probabile che le regioni centrali della stella collasserebbero fino ad un stato molto denso, come una stella di neutroni o un buco nero. Le regioni esterne della stella potrebbero essere a volte licenziate in una tremenda esplosione, chiamata supernova, che supererebbe in lucentezza a tutte le altre stelle giunte della sua galassia. Alcuni degli elementi più pesanti prodotti verso il fine della vita della stella sarebbero intrepidi di nuovo al gas della galassia, e proporzionerebbero parte della materia prima per la prossima generazione di stelle. Il nostro proprio Sole trattiene attorno ad un 2 per 100 da quegli elementi più pesanti, poiché è una stella della seconda o terza generazione, formata fa circa cinque mille milioni di anni a partire da una nuvola girevole di gas che conteneva i resti di supernove anteriori. La maggior parte del gas di quella nuvola oppure servì per formare il Sole oppure fu lanciata fuori, ma una piccola quantità degli elementi più

pesanti si accumularono insieme per formare i corpi che ora girano attorno al Sole come pianeti come la Terra. La Terra era inizialmente molto caldo e senza atmosfera. Col decorso del tempo si raffreddò ed acquisì un'atmosfera mediante l'emissione di gas delle rocce.

In quell'atmosfera primitiva non avremmo potuto sopravvivere. Non conteneva niente di ossigeno, bensì una serie di altri gas che sono velenosi per noi, come il solfuro di idrogeno, il gas che dà alle uova marce il suo odore caratteristico. È, nonostante, altre forme di vita primitive che sì potrebbero prosperare in tali condizioni. Si pensa che queste si svilupparono negli oceani, possibilmente come risultato di combinazioni a caso di atomi in grandi strutture, chiamate macromolecole, le quali erano capaci di riunire altri atomi dell'oceano per formare strutture simili. Allora, queste si sarebbero riprodursi e moltiplicato. In alcuni casi avrebbero errori nella riproduzione. La maggioranza di quegli errori sarebbero stati tali che la nuova macromolecola non potrebbe riprodursisi a sé stessa, e col tempo sarebbe stato distrutta. Tuttavia, pochi di quegli errori avrebbero prodotto nuove macromolecole che sarebbero perfino migliori per riprodursisi a loro stesse. Queste avrebbero avuto, pertanto, vantaggio, ed avrebbero teso a rimpiazzare alle macromolecole originali. In questo modo, incominciò un processo di evoluzione che condurrebbe sempre di più allo sviluppo di organismi autorreproductores complicati. Le prime forme primitive di vita consumerebbero diversi materiali, includendo solfuro di idrogeno, e staccherebbero ossigeno. Questo cambiò gradualmente l'atmosfera, fino ad arrivare alla composizione che ha oggigiorno, e permise lo sviluppo di forme di vita superiori, come i pesci, rettili, mammiferi e, infine, il genere umano.
Questa visione di un universo che cominciò essendo molto caldo e si raffreddava man mano che si espandeva è di accordo con l'evidenza delle osservazioni che possediamo attualmente. Tuttavia, lascia varie questioni importanti senza rispondere:
1, perché stava l'universo primitivo tanto caldo?

2, perché è l'universo tanto uniforme a gran scala? Perché sembra lo stesso in tutti i punti dello spazio ed in tutte le direzioni? In questione, perché la temperatura della radiazione di fondo di microonde è tanto approssimativamente uguale quando guardiamo in differenti direzioni? È come fare a vari studenti una domanda di esame. Se tutti essi danno esattamente la stessa risposta, può essere sicuro che si sono copiati tra sé. Tuttavia, nel modello descritto anteriormente, non ci sarebbe stato tempo sufficiente a partire dal *big bang affinché* la luce fosse da una regione distante ad un'altra, perfino benché le regioni stessero molto giunte nell'universo primitivo. Di accordo con la teoria della relatività, se la luce non è la sufficientemente rapida come per arrivare di una regione ad un'altra, nessuna altra informazione può farlo. Non ci sarebbe così nessuna forma nella quale differenti regioni dell'universo primitivo

sarebbero potute arrivare ad avere la stessa temperatura, a meno che per alcuno ragione inspiegata cominciasse già alla stessa temperatura.

3, perché cominciò l'universo con una velocità di espansione tanto prossima alla velocità critica che separa i modelli che collassano di nuovo di quelli che Lei expansionan indefinitamente, in modo che perfino ora, diecimila milioni di anni dopo, sta ancora espandendosi approssimativamente alla velocità critica? Se la velocità di espansione un secondo dopo il *big bang sarebbe* stato minore, perfino in una parte, in cento mille miliardi, l'universo avrebbe collassato di nuovo prima che non avesse raggiunto mai il suo volume attuale.

4, malgrado l'universo sia tanto uniforme ed omogeneo a gran scala, contiene irregolarità locali, tali come getti e galassie. Si pensa che queste si sono sviluppate a partire da piccole differenze da una regione ad un'altra nella densità dell'universo primitivo. Quale fu l'origine di quelle fluttuazioni di densità?

La teoria della relatività generale, per sé stessa, non può spiegare quelle caratteristiche o rispondere a quelle domande, dovuto alla sua predizione che l'universo cominciò con una densità infinita nella singolarità del *big bang.* Nella singolarità, la relatività generale e tutte le altre leggi fisiche cederebbero: non potrebbe predirsi che cosa uscirebbe dalla singolarità. Come si è spiegato anteriormente, questo significa che potrebbero escludersi della teoria il *big bang* e tutti gli eventi anteriori a lui, poiché non possono avere nessun effetto su quello che noi osserviamo. Lo spazio-tempo *avrebbe* una frontiera, un principio nel *big bang.*

La scienza sembra avere scoperto un insieme di leggi che, dentro i limiti stabiliti per il principio di incertezza, ci dicono come evolverà l'universo nel tempo se conosciamo il suo stato in un momento chiunque. Queste leggi sono potute essere dettate originalmente per Dio, ma sembra che egli abbia lasciato evolvere da allora all'universo di accordo con esse, e che egli non interviene oramai. Ma, come scelse Dio lo stato o la configurazione iniziale dell'universo? Quali furono le "condizioni di contorno" nel principio del tempo?

Una possibile risposta consiste in dire che Dio scelse la configurazione iniziale dell'universo per ragioni che noi non possiamo sperare di comprendere. Questo sarebbe stato certamente dentro le possibilità di un essere onnipotente, ma se l'aveva iniziato di una forma incomprensibile, perché scelse lasciarlo evolvere di accordo con leggi che noi potevamo capire? Tutta la storia della scienza è consistita in una comprensione graduale che i fatti non succedono di una forma arbitraria, ma riflettono un certo ordine soggiacente, il quale può stare o non divinamente ispirato. Sarebbe semplicemente naturale supporre che questo ordine dovrebbe applicarsi non solo alle

leggi, ma anche alle condizioni nella frontiera dello spazio-tempo che specificherebbero lo stato iniziale dell'universo.  Può avere un gran numero di modelli dell'universo con differenti condizioni iniziali, tutti i quali obbediscono alle leggi. Dovrebbe avere qualche principio che scegliesse un stato iniziale, e pertanto un modello, per rappresentare il nostro universo.

Una possibilità è quella che si conosce come condizioni di contorno caotiche. Queste suppongono implicitamente oppure che l'universo è spazialmente infinito oppure che ci sono infiniti universi. Sotto condizioni di contorno caotiche, la probabilità di trovare una regione particolare chiunque dello spazio in una configurazione data chiunque, giusto dopo il *big bang,* è la stessa, in un certo senso, che la probabilità di trovarla in qualunque altra configurazione. - lo stato iniziale dell'universo si sceglie puramente a caso. Questo significherebbe che l'universo primitivo sarebbe stato probabilmente molto caotico-e irregolare, poiché ci sono molte più configurazioni dell'universo caotiche e disordinate che uniformi ed ordinate. , Se ogni configurazione è altrettanto probabile, è verosimile che l'universo cominciasse in un stato caotico e disordinato, semplicemente perché abbondano molto più questi stati.  È difficile capire come tali condizioni caotiche iniziali avrebbero potuto dare luogo ad un universo che è tanto uniforme e regolare a gran scala, come lo è attualmente il nostro. Si aspetterebbe, anche, che le fluttuazioni di densità in un modello di questo tipo avrebbero condotto alla formazione di molti più buchi neri primitivi che il limite superiore che è stato stabilito mediante le osservazioni della radiazione di fondo di raggi gamma.

Se l'universo fosse davvero infinito spazialmente, o se ci fossero infiniti universi, avrebbe probabilmente in alcuno parte alcuni grandi regioni che avrebbero cominciato in una maniera soave ed uniforme. È sembrato qualcosa al bene conosciuto esempio dell'orda di scimmie martellando su macchine da scrivere; la maggior parte di quello che scrivono sarà sprechi, ma molto occasionalmente, per puro caso, imprimeranno uno dei sonetti di Shakespeare. Di forma analoga, nel caso dell'universo, potrebbe succedere che noi stessimo vivendo in una regione che semplicemente, per caso, è soave ed uniforme? A prima vista questo potrebbe sembrare molto improbabili, perché tali regioni soavi sarebbero superate in gran numero per le regioni caotiche ed irregolari. Tuttavia, supponiamo che solo nelle regioni lisce si fosse formato galassie e stelle, e ci fossero le condizioni appropriate per lo sviluppo di complicato organismi autorreproductores, come noi stessi che fosse capaci di farsi la domanda: perché è l'universo tanto liscio? Questo costituisce un esempio di applicazione di quello che si conosce come il principio antrópico che può parafrasarsi nella forma "vediamo l'universo nella forma che è perché noi esistiamo." Ci sono due versioni del principio antrópico, il debole e forte il. Il principio antrópico debole dice che in un universo che è grande o infinito nello spazio y/o nel tempo, le condizioni necessarie per lo sviluppo di vita intelligente si daranno solamente in certe regioni che sono limitate nel tempo e nello spazio. Gli esseri intelligenti di queste regioni non devono, pertanto, sorprendersi

se osservano che la sua localizzazione nell'universo soddisfa le condizioni necessarie per la sua esistenza. È sembrato qualcosa ad una persona ricca che vive in un ambiente ricco senza vedere nessuna povertà.

Un esempio dell'uso del principio antrópico debole consiste in "spiegare" perché il *big bang* succedè fa circa diecimila milioni di anni: si ha bisogno approssimativamente di quello tempo affinché si sviluppino esseri intelligenti. Come si spiegò anteriormente, per arrivare a dove stiamo dovette formarsi primo una generazione previa di stelle. Queste stelle convertirono una parte dell'idrogeno e dell'elio originali in elementi come carbonio ed ossigeno, a partire dai quali stiamo fatti noi. Le stelle sfruttarono dopo come supernove, ed i suoi avanzi formarono altre stelle e pianeti, tra essi quelli del nostro sistema solare che ha circa cinque mille milioni di anni. Il primo mille o due mille milioni di anni dell'esistenza della Terra furono troppo caldi per lo sviluppo di qualunque struttura complicata. Gli approssimativamente tre mille milioni di anni restanti sono stati affezionati al lento processo dell'evoluzione biologica che ha condotto dagli organismi più semplici fino ad esseri che sono capaci di misurare il tempo trascorso dal *big bang.*

Poca gente protesterebbe della validità o utilità del principio antrópico debole. Alcuni, tuttavia, vanno molto più in là e propongono una versione forte del principio. Di accordo con questa nuova teoria, o ci sono molti universi differenti, o molte regioni differenti di un unico universo, ogni uno/a con la sua propria configurazione iniziale e, forse, col suo proprio insieme di leggi della scienza. Nella maggioranza di questi universi, le condizioni non sarebbero appropriate per lo sviluppo di organismi complicati; solamente nei pochi universi che sono come quello nostro si svilupperebbero esseri intelligenti che si farebbero la seguente domanda: perché è l'universo come lo vediamo? La risposta, allora, è semplice: se fosse stato differente, noi non staremmo qui!

Le leggi della scienza, come li conosciamo attualmente, contengono molte quantità fondamentali, come la grandezza del carico elettrico dell'elettrone e la relazione tra le masse del protone e dell'elettrone.  Noi non possiamo, almeno per il momento, predire i valori di quelle quantità a partire dalla teoria; dobbiamo trovarli mediante l'osservazione. Può essere che un giorno scopriamo una teoria unificatrice completa che predica tutte quelle quantità, ma è anche possibile che alcune, o tutte esse, varino di un universo ad un altro, o dentro uno unico. Il fatto notevole è che i valori di quelle quantità sembrano essere stato stretto sottilmente per fare possibile lo sviluppo della vita.  Per esempio, se il carico elettrico dell'elettrone fosse stato solo leggermente differente, le stelle, o sarebbero stati incapaci di bruciare idrogeno ed elio, o, al contrario, non avrebbero sfruttato. Ovviamente, potrebbe avere altre forme di vita intelligente, non immaginate neanche per gli scrittori di fantascienza che non necessitasse la luce di una stella come il Sole o gli elementi chimici più pesanti che

sono fabbricati nelle stelle e restituiti allo spazio quando queste sfruttano. Nonostante, sembra evidente che ci sono relativamente poche gamme di valori per le quantità citate che permetterebbero in ogni modo lo sviluppo di vita intelligente. La maggior parte degli insiemi di valori darebbero posto ad universi che, benché potessero essere molto begli, non potrebbero trattenere nessuno capace da meravigliarsi di quella bellezza. Questo può prendersi
oppure come prova di un proposito divino nella Creazione e nell'elezione delle leggi della scienza, oppure come sostegno del principio antrópico forte.

Possono mettersi varie obiezioni a questo principio come spiegazione dello stato osservato dell'universo. In primo luogo, in che senso si può dire che cosa esistono tutti quegli universi differenti? Se sono realmente separati alcuni di altri, quello che succeda in un altro universo non può avere nessuna conseguenza osservabile nel nostro. Dobbiamo, pertanto, utilizzare il principio di economia ed eliminarli della teoria. Se, d'altra parte, ci sono differenti regioni di un unico universo, le leggi della scienza dovrebbero essere i miei. - nas in ogni regione, perché altrimenti uno non potrebbe muoversi con continuità di una regione ad un'altra. In questo caso le uniche differenze tra le regioni starebbero nelle sue configurazioni iniziali, e, pertanto, il principio antrópico forte si diminuirebbe al debole.

Una seconda obiezione all'inizio antrópico forte è che va contro la corrente di tutta la storia della scienza. Abbiamo evoluto dalle cosmologie geocentriche di Tolomeo ed i suoi predecessori, attraverso la cosmologia eliocentrica di Copernico e Galileo, fino alla visione moderna, nella quale la Terra è un pianeta di volume mezzo che gira attorno ad una stella corrente nei sobborghi esterni di una galassia spirale ordinaria, la quale, a sua volta, è solamente uno tra il miliardo di galassie dell'universo osservabile. Nonostante ciò, il principio antrópico forte pretenderebbe che tutta quella vasta costruzione esiste semplicemente per noi. Quello è molto difficile da credere. Il nostro sistema solare è certamente un prerequisito per la nostra esistenza, e questo potrebbe estendersi all'insieme della nostra galassia, per tenere in conto la necessità di una generazione precoce di stelle che creasse gli elementi più pesanti. Ma non sembra c'essere nessuna necessità né di tutte le altre galassie né che l'universo sia tanto uniforme e simile, a gran scala, in tutte le direzioni.

Uno potrebbe sentirsi più soddisfatto col principio antrópico, almeno nella sua versione debole, se Lei potesse provare che un buon numero di differenti configurazioni iniziali dell'universo avrebbero evoluto fino a produrre un universo come quell'osservarci. Se questo fosse il caso, un universo che Lei sviluppasse a partire da qualche tipo di condizioni iniziali aleatorie dovrebbe contenere varie regioni che fosse soavi ed uniformi e che fosse adeguate per l'evoluzione di vita intelligente. Al contrario, se lo stato iniziale dell'universo dovette essere scelto con estremo curato per condurre ad una situazione come quella che vediamo intorno a nostro, sena improbabile che

l'universo contenesse alcuno regione nella quale apparisse la vita. Nel modello del *big bang* caldo descritto anteriormente, non ebbe tempo sufficiente affinché il caldo fluisse di una regione ad un'altra nell'universo primitivo. Questo significa che nello stato iniziale dell'universo dovrebbe c'essere stata esattamente da tutte le parti la stessa temperatura, per spiegare il fatto che la radiazione di fondo di microonde abbia la stessa temperatura in tutte le direzioni in cui guardiamo. Anche la velocità di espansione iniziale dovrebbe essere stato scelta con molta precisione, affinché la velocità di espansione fosse ancora tanto prossima alla velocità critica necessaria per evitare di collassare di nuovo. Questo vuole dire che, se il modello del *big bang* caldo fosse corretto dall'inizio del tempo, lo stato iniziale dell'universo dovrebbe essere stato scelto veramente con molto curato. Sarebbe molto difficile spiegare perché l'universo avrebbe dovuto cominciare giustamente di quella maniera, eccetto se lo consideriamo come l'atto di un Dio che pretendesse di creare esseri come noi.

In un tentativo di trovare un modello dell'universo nel quale molte configurazioni iniziali differenti avrebbe potuto evolvere verso qualcosa di simile all'universo attuale, un scienziato dell'Istituto Tecnologico della Massachusetts, Alan Guth, suggerì che l'universo primitivo avrebbe potuto passare per un periodo di espansione molto rapida. Questa espansione si chiamerebbe "inflazionaria", facendo capire che ci fu un momento in cui l'universo si espanse ad un ritmo crescente, invece di al ritmo decrescente al che lo fa oggigiorno. Di accordo con Guth, il raggio dell'universo aumentò dietro un milione di miliardi di miliardi, un 1 con trenta zeri, di volte in solo una piccolissima frazione di secondo.

Guth suggerì che l'universo cominciò a partire dal *big bang* in un stato molto caldo, ma piuttosto caotico. Queste alte temperature avrebbero fatto che le particelle dell'universo stessero muovendosi molto rapidamente ed avesse energie alte. Come discutiamo anteriormente, sarebbe di sperare che a temperature tanto alte le forze nucleari forti e deboli e la forza elettromagnetica fossero unificatrici in un'unica forza. Man mano che l'universo si espandeva, si raffreddava, e le energie delle particelle scendevano. Finalmente si produrrsi quello che si chiama una transizione di fase, e la simmetria tra le forze si romperebbe: l'interazione forte diventerebbe differente delle forze debole ed elettromagnetica. Un esempio corrente di transizione di fase è il congelamento dell'acqua quando se la raffredda. L'acqua liquida è simmetrica, la stessa in ogni punto ed in ogni direzione. Tuttavia, quando si formano vetri di ghiaccio, questi avranno posizioni definite e saranno allineati in alcuno direzione, egli quale romperà la simmetria dell'acqua. Nel caso dell'acqua, se si è diligente, uno può "sobreenfriarla", questo è, può ridurrsi la temperatura sotto il punto di congelamento, O "C, senza che si formi ghiaccio. Guth suggerì che l'universo potrebbe comportarsi di una forma analoga: la temperatura potrebbe stare sotto il valore critico senza che la simmetria tra le forze Lei rompesse. Se questo succedesse, l'universo starebbe in un stato instabile, con più energia che se la simmetria fosse stata rotta. Può dimostrarsi

che quell'energia extra speciale avrebbe un effetto antigravitatorio: avrebbe agito esattamente come la costante cosmologica che Einstein introdusse nella relatività generale, quando stava tentando di costruire un modello statico dell'universo. Dato che l'universo starebbe già espandendosi esattamente della stessa forma che nel modello del *big bang* caldo, l'effetto repulsivo di quella costante cosmologica avrebbe fatto che l'universo Lei espandesse sempre ad una velocità crescente. Perfino in regioni dove ci fossero più particelle di materia che la calza, l'attrazione gravitazionale della materia sarebbe stata superata per la repulsione dovuta alla costante cosmologica effettiva. Così, quelle regioni Lei expandarían anche di una forma inflazionario accelerata. Come Lei expandasen e le particelle di materia Lei separasse più, ci troveremmo con un universo in espansione che conterrebbe molto poche particelle e che starebbe ancora nello stato sobreenfriado. Qualunque irregolarità nell'universo sarebbe stata semplicemente lisciata per l'espansione, dello stesso modo che le pieghe di un globo sono lisciate quando si gonfia. In questo modo, lo stato attuale soave ed uniforme dell'universo potrebbe aversi sviluppato a partire da molti stati iniziali non uniformare differenti.

In un universo tale, nel quale l'espansione fosse accelerata per una costante cosmologica invece di frenata per l'attrazione gravitazionale della materia, ci sarebbe stato tempo sufficiente affinché la luce viaggiasse di una regione ad un'altra nell'universo primitivo. Questo potrebbe proporzionare una soluzione al problema esposto prima, di perché differenti regioni dell'universo primitivo avrebbero le stesse proprietà. Inoltre, la velocità di espansione dell'universo si avvicinerebbe automaticamente molto alla velocità critica determinata per la densità di energia dell'universo. Quello che spiegherebbe perché la velocità di espansione è ancora tanto prossima alla velocità critica, senza dovere supporre che la velocità di espansione iniziale dell'universo fosse scelta molto accuratamente.

L'idea dell'inflazione potrebbe spiegare anche perché c'è tanta materia nell'universo. C'è qualcosa come dieci miliardi di miliardi di miliardi di miliardi di miliardi di miliardi di miliardi, un 1 con ottanta cinque zeri dietro, di particelle nella regione dell'universo che noi possiamo osservare. Da dove uscirono tutte esse? La risposta è che, nella teoria quantica, le particelle possono essere create a partire dall'energia nella forma di pari partícula/antipartícula. Ma semplicemente questo espone la questione da dove uscì l'energia. La risposta è che l'energia totale dell'universo è esattamente zero. La materia dell'universo è fatta di energia positiva. Tuttavia, tutta la materia si sta accattivando a sé stessa mediante la gravità. Due pezzi di materia che siano prossimi l'un l'altro hanno meno energia che i due stessi pezzi molto separati, perché deve spendere energia per separarli contro la forza gravitazionale che sta unendoli. Così, in un certo senso, il campo gravitazionale ha energia negativa. Nel caso di un universo che è approssimativamente uniforme nello spazio, può dimostrarsi che questa energia

gravitazionale negativa cancello esattamente all'energia positiva corrispondente alla materia. In questo modo, l'energia totale dell'universo è zero.

Orbene, due per zero è anche zero. Quindi, l'universo può duplicare la quantità di energia positiva di materia ed anche duplicare l'energia gravitazionale negativa, senza violare la conservazione dell'energia. Questo non succede nell'espansione normale dell'universo nel quale la densità di energia della materia diminuisce man mano che l'universo diventa più grande. Sé succede, tuttavia, nell'espansione inflazionario, perché la densità di energia dello stato sobreenfriado rimane costante mentre l'universo si espande: quando l'universo duplica il suo volume, l'energia positiva di materia e l'energia gravitazionale negativa si raddoppiano entrambe, in modo che l'energia totale continua ad essere zero. Durante la fase inflazionario, l'universo aumenta moltissimo il suo volume. In questo modo, la quantità totale di energia disponibile per fabbricare particelle diventa molto grande. Come Guth ha segnalato, si dice che non c'è né un cibo gratis. Ma l'universo è gratis per eccellenza" il cibo.

L'universo si non sta espandendo attualmente di una forma inflazionaria. Così, dovrebbe avere qualche meccanismo che eliminasse alla gran costante cosmologica effettiva e che, pertanto, modificasse la velocità di espansione, di accelerata a frenata per la gravità, come quella che abbiamo oggigiorno. Nell'espansione inflazionario uno potrebbe sperare che finalmente si rompesse la simmetria tra le forze, dello stesso modo che alla fine l'acqua sobreenfriada si congela. L'energia extra dello stato senza rottura di simmetria sarebbe liberata allora, e scalderebbe giusto all'universo di nuovo fino ad una temperatura sotto la temperatura critica nella quale c'è simmetria tra le forze.  L'universo continuerebbe allora espandendosi e si raffredderebbe esattamente come nel modello del *big bang* caldo, ma ci sarebbe ora una spiegazione di perché l'universo si sta espandendo giusto alla velocità critica e perché differenti regioni hanno la stessa temperatura.

Nell'idea originale di Guth si supponeva che la transizione di fase succedeva di forma repentina, in una maniera simile a come appaiono i vetri di ghiaccio nell'acqua molto fredda. L'idea supponeva che si sarebbero formati "bolle" della nuova fase di simmetria rotta nella fase antica, come bolle di vapore circondate di acqua bollendo. Si pensava che le bolle si espansero e si unirono alcune con altre fino a che tutto l'universo stette nella nuova fase.  Il problema era, come me ed altre persone segnaliamo che l'universo si stava espandendo tanto rapidamente che, perfino se le bolle crescevano alla velocità della luce, si starebbero separando alcune di altre, e pertanto non potrebbero unirsi. L'universo sarebbe rimasto in un stato altamente non uniformi, con alcuni regioni che avrebbero conservato ancora la simmetria tra le differenti forze. Questo modello dell'universo non corrisponderebbe a quello che osserviamo.

In ottobre di 1981, andai a Mosca con motivo di una conferenza su gravità quantica. Dopo la conferenza diedi un seminario sul modello inflazionario ed i suoi problemi, nell'Istituto Astronomico Sternberg. Normalmente portava prima con me a qualcuno che leggesse le mie conferenze perché la maggioranza della gente non poteva capire la mia voce. Ma non c'era tempo per preparare quello seminario, per quello che lo diedi io stesso, facendo che uno dei miei studenti graduati ripetesse le mie parole. La cosa funzionò molto bene e mi incontrò molto più contatto i miei uditori.  Tra l'udienza si trovava un giovane russo, Andrei Confini, dell'Istituto Lebedev di Mosca. Egli proponeva che la difficoltà relativamente a che le bolle Lei non unisse potrebbe essere evitata se le bolle fossero tanto grandi che la nostra regione dell'universo stesse tutta ella contenuta dentro un'unica bolla. Affinché questo funzionasse, la transizione di una situazione con simmetria ad un'altra senza lei dovette succedere molto lentamente dentro la bolla, egli quale è completamente possibile di accordo con le teorie di gran unificazione.  L'idea di Limite di una rottura lenta della simmetria ero molto buona, ma posteriormente mi resi conto che le sue bolle dovrebbero essere stato più grandi del volume dell'universo in quello momento! Provai che, invece di quello, la simmetria si sarebbe rotta contemporaneamente da tutte le parti, invece di solamente dentro le bolle. Ciò condurrebbe ad un universo uniforme, come quello che osserviamo. Io ero molto eccitato per questa idea e la discussi con uno dei miei alunni, Ian Moss. Come amico di Limite, mi trovai, tuttavia, in un buon guaio, quando, posteriormente, una rivista scientifica mi inviò il suo articolo e mi consultò se era adeguata la sua pubblicazione. Risposi che esisteva la sentenza che le bolle fossero maggiori che l'universo, ma che l'idea basilare di una rottura lenta della simmetria era molto buona. Raccomandai che l'articolo fosse pubblicato come stava, poiché correggerlo supporrebbe a Limite vari mesi, poiché qualunque cosa che egli inviasse ai paesi occidentali dovrebbe passare per la censura sovietica che non era né molto abile né molto rapida con gli articoli scientifici. D'altra parte, scrissi un articolo breve con Ian Moss nella stessa rivista, nel quale segnalavamo quello problema con la bolla e mostravamo come potrebbe essere risoluto.

Al giorno dopo di tornare da Mosca, uscii per Philadelfia, dove andava a ricevere una medaglia dell'istituto Franklin. La mia segretaria, Judy Fella, aveva utilizzato il suo niente disprezzabile incantesimo per persuadere alle British Airways che ci proporzionasse alle due piazze gratuite in un Concordi, come una forma di pubblicità. Tuttavia, la forte pioggia che cadeva quando mi dirigevo verso l'aeroporto fece che perdessimo l'aeroplano. Nonostante, arrivai finalmente da Filadelfia e ricevei la medaglia. Mi chiesero allora che dirigesse un seminario sull'universo inflazionario nell'Università Drexel di Filadelfia. Diedi lo stesso seminario sui problemi dell'universo inflazionario che aveva portato a termine a Mosca. Paul Steinhardt ed Andras Albrecht dell'Università del Pennsylvania, proposero indipendentemente dopo un'idea molto simile a quella di Limite pochi mesi. Essi, insieme a Limite, stanno considerati come i gestori di quello che si chiama << il nuovo modello inflazionario >>, basato nell'idea di

una rottura lenta di simmetria. , Il vecchio modello inflazionario era il suggerimento originale di Guth della rottura rapida di simmetria con la formazione di bolle.
Il nuovo modello inflazionario fu un buon tentativo per spiegare perché l'universo è come è. Tuttavia, io ed altre persone mostriamo che, almeno nella sua forma originale, prediceva molto variazioni nella temperatura della radiazione di fondo di microonde maggiore della quale si osservano. Anche il lavoro posteriore ha lanciato dubbi su se potè succedere una transizione di fase del tipo richiesto nell'universo primitivo. Nella mia opinione personale, oggigiorno il nuovo modello inflazionario è morto come teoria scientifica, benché molta gente non si sembri c'essere informato del suo decesso ed ancora continuano a scrivere articoli come se fosse vitale.  Un modello migliore, chiamata modello inflazionario caotico, fu proposto per Limite in 1983. In lui non si prodursi nessuna transizione di fase o sobreenfriamiento. Nel suo posto, c'è un campo di porcospino 0, il quale, dovuto a fluttuazioni quantiche, avrebbe valori grandi in alcuni regioni dell'universo primitivo. L'energia del campo in quelle regioni si comporterebbe come una costante cosmologica. Avrebbe un effetto gravitazionale repulsivo, e, di quello modo, farebbe che quelle regioni Lei espandesse di una forma inflazionaria. Man mano che Lei espandesse, l'energia del campo decrescerebbe lentamente in esse, fino a che l'espansione inflazionaria cambiasse ad un'espansione come quella del modello del *big bang* caldo. Una di queste regioni si trasformerebbe in quello che attualmente vediamo come universo osservabile. Questo modello ha tutti i vantaggi dei modelli inflazionarii anteriori, ma non dipende da una dubbiosa transizione di fase, e può proporzionare inoltre un valore ragionevole per le fluttuazioni nella temperatura della radiazione di fondo di microonde che coincide con le osservazioni.

Questo lavoro su modelli inflazionarii mostrò che lo stato attuale dell'universo avrebbe potuto originare a partire da un numero abbastanza grande di configurazioni iniziali differenti. Questo è importante, perché dimostra che lo stato iniziale della parte dell'universo che abitiamo non dovette essere scelto con gran attenzione. In questo modo possiamo, se lo desideriamo, utilizzare il principio antrópico debole per spiegare perché l'universo ha il suo aspetto attuale. Non può essere, tuttavia, che *qualunque* configurazione iniziale avrebbe condotto ad un come quello che osserviamo. Questo può dimostrarsi un stato molto differente per l'universo nel momento attuale, diciamo uno con molti gonfiori e molto irregolare. Potrebbero usarsi le leggi la scienza per rimontare all'indietro l'universo nel tempo, e determinare la sua configurazione in tempi anteriori. Di accordo coi teoremi della singolarità della relatività generale classica, ci sarebbe stata una singolarità del tipo *big bang.*  Se Lei sviluppasse un universo come questo in avanti nel tempo, di accordo con le leggi della scienza, finirebbe con lo stato grumoso ed irregolare del quale si spaccò. Così, deve c'essere configurazioni iniziali che non avrebbero dato luogo ad un universo come quello che vediamo oggi. Pertanto, perfino il modello inflazionario non ci dice perché la configurazione iniziale non fu di un tipo tale che producesse qualcosa di molto differente di quello che osserviamo. Dobbiamo girare all'inizio antrópico per una spiegazione? Si trattò semplicemente di un

risultato fortunato? Questo sembrerebbe una situazione scoraggiato, una negazione di tutte le nostre speranze per comprendere l'ordine soggiacente dell'universo.

Per potere predire come aveva dovuto incominciare l'universo, si hanno bisogno di leggi che siano valide nel principio del tempo. Se la teoria classica della relatività generale fosse corretta, i teoremi della singolarità che Roger Penrose ed io dimostriamo, proverebbero che il principio del tempo sarebbe stato un punto di densità infinita e di curvatura dello spazio-tempo infinita.  Tutte le leggi conosciute della scienza cederebbero in un punto come quello. Potrebbe supporrsi che ci fossero nuove leggi che fossero valide nelle singolarità, ma sarebbe molto difficile perfino formulare tali leggi in punti con tanto cattivo comportamento, e non avremmo nessuna guida a partire dalle osservazioni su quali quelle leggi potrebbero essere. Tuttavia, quello che realmente i teoremi di singolarità indicano è che il campo gravitazionale diventa tanto forte che gli effetti gravitazionali quantici diventano importanti: la teoria classica non costituisce già una buona descrizione dell'universo. Pertanto, è necessario utilizzare una teoria quantica della gravità per discutere le tappe molto precoci dell'universo. Come vedremo, nella teoria quantica è possibile che le leggi ordinarie della scienza siano valide da tutte le parti, includendo il principio del tempo: non è necessario postulare nuove leggi per le singolarità, perché non ha perché c'essere nessuna singolarità nella teoria quantica.

Non possediamo ancora una teoria completa e consistente che combini la meccanica quantica e la gravità. Tuttavia, siamo abbastanza sicuri di alcune delle caratteristiche che una teoria unificatrice di quello tipo dovrebbe avere. Una è che deve incorporare l'idea di Feynman di formulare la teoria quantica in termini di una somma su storie. Dentro questa messa a fuoco, una particella non ha semplicemente una storia unica, come quell'avrebbe in una teoria classica. Invece di quello si suppone che segue tutte le strade possibili nello spazio-tempo, e che con ognuna di quelle storie è associata un compagno di numeri, uno che rappresenta il volume di un'onda e l'altro che rappresenta la sua posizione nel ciclo, la sua fase. La probabilità che la particella passi attraverso qualche punto particolare, per esempio, si trova sommando le onde associate con ogni cammino possibile che passi per quello punto. Quando uno tratta realmente di calcolare quelle somme, tuttavia, si imbatte in problemi tecnici importanti. L'unica forma di sorteggiarli consiste nella seguente ricetta peculiare: bisogna sommare le onde corrispondenti a storie della particella che non stanno nel tempo "reale" che lei ed io sperimentiamo, ma hanno luogo in quello che si chiama tempo immaginario. Un tempo immaginario può suonare a fantascienza, ma si tratta, in realtà, di un concetto matematico ben definito. Se prendiamo qualunque numero ordinario, o "reale", e lo moltiplichiamo per sé stesso, il risultato è un numero positivo. , Per esempio, 2 per 2 è 4, ma lo è anche -2 per -2.  È, nonostante, numeri speciali (chiamate immaginarie  che danno numeri negativi quando si moltiplicano per se stessi. , La chiamata i, quando si moltiplica per sé stesso, dà -1, 2i moltiplicato per sé

stesso dà -4, e così via.  Per evitare le difficoltà tecniche nella somma di Feynman su storie, bisogna usare un tempo immaginario.  Cioè, per i propositi del calcolo bisogna misurare il tempo utilizzando numeri immaginari invece di reali. Questo ha un effetto interessante sullo spazio-tempo: la distinzione tra tempo e spazio sparisce completamente.  Dato un spazio-tempo nel quale gli eventi hanno valori immaginari della coordinata temporanea, si dice di lui che è euclídeo, in memoria dell'antico greco Euclide chi fund,ó lo studio della geometria di superfici bidimensionali. Quello che noi chiamiamo ora spazio-tempo euclídeo è molto simile eccetto che ha quattro dimensioni invece di due. Nello spazio-tempo euclídeo non è nessuna differenza tra la direzione temporanea e le direzioni spaziali. Al contrario, nell'espaciotiempo - reale, nel quale gli eventi si descrivono mediante valori ordinari, reali, della coordinata temporanea, è facile notare la differenza: la direzione del tempo in tutti i punti si trova dentro il cono di luce, e le direzioni spaziali si trovano fuori. In qualsiasi caso, in quello che alla meccanica quantica corrente riguarda, possiamo considerare il nostro impiego di un tempo immaginario e di un spazio-tempo euclídeo meramente come un montaggio, o un trucco, matematico per ottenere risposte circa l'espaciotiempo reale.

Una seconda caratteristica che crediamo che deve fare parte di qualunque teoria definitiva è l'idea di Einstein che il campo gravitazionale si rappresenta mediante un spazio-tempo curvo: le particelle tentano di seguire la strada più somiglianza possibile ad una linea retta in un spazio curvo, ma poiché lo spazio-tempo non è piano, le sue strade sembrano piegarsi, come se fosse per effetto di un campo gravitazionale. Quando applichiamo la somma di Feynman su storie alla visione di Einstein della gravità, la cosa analoga alla storia di una particella è ora un spazio-tempo curvo completo che rappresenta la storia di tutto l'universo. Per evitare le difficoltà tecniche calcolando realmente la somma su storie, questi spazio-tempi curvi devono essere euclídeos.  Questo è, il tempo è immaginario ed indistinguibile delle direzioni spaziali. Per calcolare la probabilità di trovare un spazio-tempo reale con una certa proprietà, per esempio, avendo lo stesso aspetto in tutti i punti ed in tutte le direzioni, si sommano le onde associate a tutte le storie che hanno quella proprietà.

Nella teoria classica della relatività generale sono molti spazio-tempi curvi possibili differenti, ognuno dei quali corrisponde ad un stato iniziale differente dell'universo. Se conoscesse lo stato iniziale del nostro universo, conosceremmo la sua storia completa. Di forma simile, nella teoria quantica della gravità sono molti stati quantici differenti possibili per l'universo.  Di nuovo, se sapesse come si comportarono nei momenti iniziali gli spazio-tempi curvi che intervengono nella somma su storie, conosceremmo lo stato quantico dell'universo.

Nella teoria classica della gravità, basata in un'espaciotiempo reale, ci sono solamente due maniere nelle quali può comportarsi l'universo: o è esistito per un tempo infinito, o ebbe un principio in una singolarità tra qualche tempo finito nel passato. Nella teoria

quantica della gravità, d'altra parte, sorge una terza possibilità. Poiché si impiegano spazio-tempi euclídeos, nei che la direzione del tempo sta in piede di uguaglianza con le direzioni spaziali, è possibile che lo spazio-tempo sia finito in estensione e che, tuttavia, non abbia nessuna singolarità che formi una frontiera o un bordo. Lo spazio-tempo sarebbe come la superficie nell'Università della California, in Santa Barbara. Lì, insieme al mio amico e collega, Jim Hartle, calcoliamo che condizioni dovrebbe compiere l'universo se lo spazio-tempo non avesse nessuna frontiera.  Quando girai a Cambridge, continuai questo lavoro con due dei miei studenti di ricerca, Julián Luttrel e Jonathan Halliwell.

Mi piacerebbe sottolineare che questa idea che tempo e spazio devono essere finiti e senza frontiera è esattamente una *proposta:* non può essere dedotta di nessun altro principio. Come qualunque altra teoria scientifica, può stare suggerita inizialmente per ragioni estetiche o metafisiche, ma la prova reale consiste in vedere se ottiene predizioni che siano di accordo con l'osservazione. Questo, tuttavia, è difficile da determinare nel caso della gravità quantica per due motivi. In primo luogo, come si spiegherà nel prossimo capitolo, non siamo ancora completamente sicuri circa che teoria combina con successo la relatività generale e la meccanica quantica, benché sappiamo abbastanza busta la forma che deve avere detta teoria. In secondo posto, qualunque modella che descrivesse l'universo intero in dettaglio sarebbe troppo complicata matematicamente affinché fosse capaci di calcolare predizioni esatte. Quindi, bisogna fare supposizioni simplificadoras ed avvicinamenti; ed allora il problema di ottenere predizioni continua perfino ad essere formidabile.

Ogni istoria di quelle che intervengono nella somma su storie descriverà non solo lo spazio-tempo, ma anche tutto quello che c'è in lui, incluso qualunque organismo complicato, come esseri umani che possono osservare la storia dell'universo.  Questo può proporzionare un'altra giustificazione del principio antrópico, perché se tutte le storie sono possibili, allora, nella misura in che noi esistiamo in una delle storie, possiamo usare il principio antrópico per spiegare perché l'universo si trova nella forma in cui è.  Che significato può essere attribuito esattamente alle altre storie, nelle quali noi non esistiamo, non è chiaro. Questa messa a fuoco di una teoria quantica della gravità sarebbe molto più soddisfacente, tuttavia, se Lei potesse dimostrare che, usando la somma su storie, il nostro universo non è semplicemente uno delle possibili storie bensì uno dei più probabili. Per farlo, dobbiamo realizzare la somma su storie per tutti gli espaciotiempos euclídeos possibili che non abbiano nessuna frontiera.

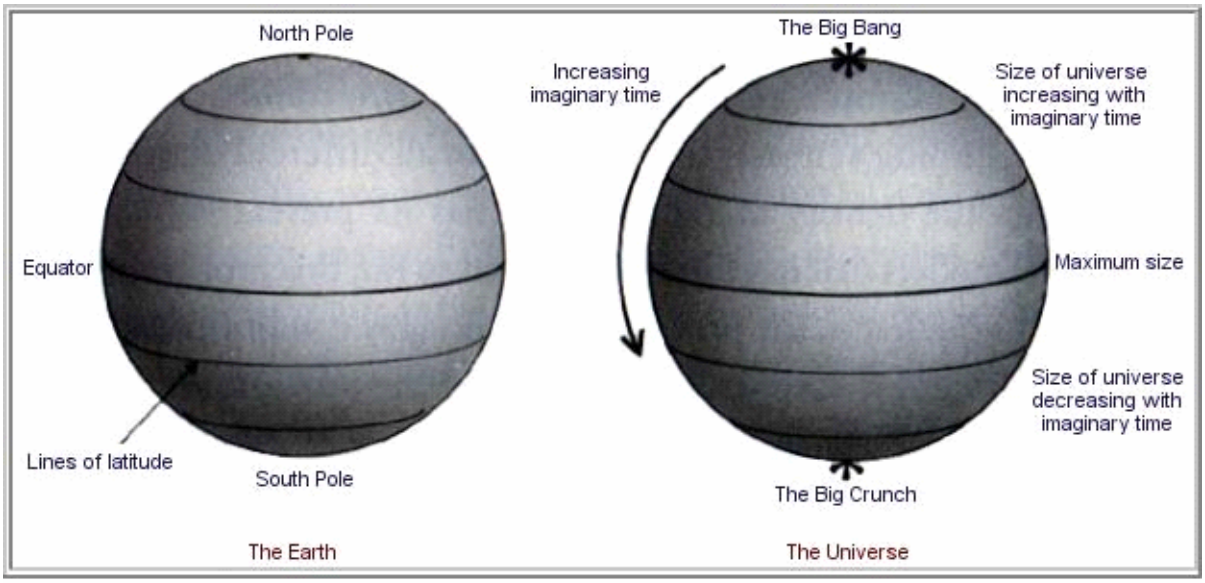



Figura 8:1

Con la condizione che non ci sia nessuna frontiera si ottiene che la probabilità di trovare che l'universo segue la maggioranza delle storie possibili è spregevole, ma che c'è una famiglia particolare di storie che sono molto più probabili delle altre. Queste storie possono immaginarsi mentalmente come se fosse la superficie della Terra, dove la distanza dal polo nord rappresenterebbe il tempo immaginario, ed il volume di un circolo a distanza costante del polo. nord rappresenterebbe il volume spaziale dell'universo. L'universo comincia nel polo nord come un unico punto. Man mano che uno si muove verso il sud, i circoli di latitudine, a distanza costante del polo nord, diventano più grandi, e corrispondono all'universo espandendosi nel tempo immaginario, figura 8.1. L'universo raggiungerebbe un volume massimo nell'equatore, e si contrarsi col tempo immaginario crescente fino ad un unico punto nel polo meridionale. Malgrado l'universo avesse un volume nullo nei poli nord e sud, questi punti non sarebbero singolarità, non sarebbero più singolari di quello che lo sono i poli nord e sud sulla Terra. Le leggi della scienza sarebbero valide in essi, esattamente uguale a come lo sono nella Terra.

La storia dell'universo nel tempo reale, tuttavia, avrebbe un aspetto molto differente. Fa circa dieci o venti mille milioni di anni avrebbe un volume minimo che sarebbe uguale al raggio massimo della storia in tempo immaginario. In tempi reali posteriori, l'universo Lei expandería come nel modello inflazionario caotico proposto per Limite, ma non dovrebbe supporre ora che l'universo fu creato nel tipo di stato corretto. L'universo Lei expandería fino a raggiungere un volume molto grande e finalmente collasserebbe di nuovo in quello che sembrerebbe una singolarità nel tempo reale. Così, in un certo senso, continuiamo a stare tutti condannati, perfino benché ci manteniamo lontano dai buchi neri. Solamente se potesse farci una rappresentazione dell'universo in termini del tempo immaginario non ci sarebbe nessuna singolarità.

Se l'universo stesse realmente in un stato quantico come quello descritto, non avrebbero singolarità nella storia dell'universo nel tempo immaginario. Potrebbe sembrare, pertanto, che il mio lavoro più recente avrebbe annullato completamente i risultati del mio lavoro previo sulle singolarità. Tuttavia, come si indicò prima, l'importanza reale dei teoremi della singolarità è che provano che il campo gravitazionale deve diventare tanto forte che gli effetti gravitazionali quantici non possono essere ignorati. Questo, in realtà, condusse all'idea che l'universo potrebbe essere finito nel tempo immaginario, ma senza antistanti o singolarità. Il povero astronauta che cade in un buco nero continua a finire male; solo se vivesse nel tempo immaginario non troverebbe nessuna singolarità.

Tutto questo potrebbe suggerire che la chiamata tempo immaginario è realmente il tempo reale, e che quella che noi chiamiamo tempo reale è solamente una chimera. Nel tempo reale, l'universo ha un principio ed un fine in singolarità che formano una frontiera per lo spazio-tempo e nelle quali le leggi della scienza cedono. Ma nel tempo immaginario non ci sono singolarità o antistanti. Cosicché, forse, quello che chiamiamo tempo immaginario è realmente più basilare, e quella che chiamiamo accampamento è semplicemente un'idea che inventiamo per aiutarci a descrivere come pensiamo che è l'universo. Ma, di accordo col punto di vista che esposi nel capitolo 1, una teoria scientifica è giustamente un modello matematico che costruiamo per descrivere le nostre osservazioni: esiste unicamente nelle nostre menti. Pertanto non ha senso domandare: che cosa è la cosa reale, il tempo "reale" o il "immaginario?" Dipenderà semplicemente di quale sia la descrizione più utile.

Può utilizzarla anche si somma su storie, insieme alla proposta di nessuna frontiera, per verificare che proprietà dell'universo è probabile che si dìano giunte. Per esempio, può calcolarsi la probabilità che l'universo si stia espandendo approssimativamente alla stessa velocità in tutte le direzioni in un momento in cui la densità dell'universo abbia il suo valore attuale. Nei modelli semplificati che sono stati esaminati fino ad ora, questa probabilità risulta essere alta; questo è, la condizione proposta di mancanza di frontiera conduce alla predizione che è eccessivamente probabile che la velocità attuale di espansione dell'universo sia quasi la stessa in tutte direzioni. Questo è consistente con le osservazioni della radiazione di fondo di microonde, la quale dimostrazione quasi la stessa intensità in qualunque direzione. Se l'universo stesse espandendosi più rapidamente in alcune direzioni che in altre, l'intensità della radiazione di quelle direzioni sarebbe ridotta per un spostamento addizionale verso il rosso.

Attualmente si stanno calcolando predizioni addizionali a partire dalla condizione che non esista nessuna frontiera. Un problema particolarmente interessante è quello relativamente al valore delle piccole deviazioni rispetto alla densità uniforme nell'universo primitivo che provocarono in primo luogo la formazione delle galassie,

delle stelle dopo e, finalmente, di noi.  Il principio di incertezza implica che l'universo primitivo non era potuto essere completamente uniforme, poiché dovettero esistere alcuni incertezze o fluttuazioni nelle posizioni e velocità delle particelle. Se utilizziamo la condizione che non ci sia nessuna frontiera, troviamo che l'universo ebbe, in realtà, che avere cominciato giustamente non con la minima uniformità possibile, permessa per il princípio di incertezza. L'universo avrebbe sofferto allora un periodo di rapida espansione, come nei modelli inflazionarii. Durante quello periodo, le non uniformità iniziali si sarebbero amplificate fino a farsi il sufficientemente grandi come per spiegare l'origine delle strutture che osserviamo intorno a nostro.  In un universo in espansione nel quale la densità di materia variasse leggermente di un posto ad un altro, la gravità avrebbe provocato che le regioni più dense frenassero la sua espansione e cominciasse a contrarsisi. Ciò condurrebbe alla formazione di galassie, di stelle, e, finalmente, perfino di insignificanti creature come noi stessi. In questo modo, tutte le complicate strutture che vediamo nell'universo potrebbero essere spiegate mediante la condizione di assenza di frontiera per l'universo, insieme al principio di incertezza della meccanica quantica.

L'idea che distanzio e tempo possano formare una superficie chiusa senza frontiera ha anche profonde applicazioni sulla carta di Dio nei temi dell'universo. Col successo delle teorie scientifiche per descrivere avvenimenti, la maggioranza della gente è arrivata a credere che Dio permette che l'universo evolva di accordo con un insieme di leggi, nelle quali egli non interviene per infrangerli. Tuttavia, le leggi non ci dicono che aspetto dovette avere l'universo quando cominciò; ancora dipenderebbe da Dio dare saggia all'orologio e scegliere la forma di metterlo in moto. Mentre non appena l'universo avesse un principio, potremmo supporre che ebbe un creatore. Ma se l'universo è realmente autocontenuto, se non ha nessuna frontiera o bordo, non avrebbe né principio né termine: semplicemente sarebbe. Che posto rimane, allora, per un creatore?

# Capitolo 9

## LA FRECCIA DEL TEMPO

Nei capitoli anteriori abbiamo visto come le nostre concezioni sulla natura del tempo hanno cambiato con gli anni. Fino a principi di questo secolo la gente credeva nel tempo assoluto. Cioè in cui ogni evento potrebbe essere etichettato con un numero chiamato "tempo" di una forma unica, e tutti i buoni orologi sarebbero di accordo nell'intervallo di tempo trascorso in due eventi. Tuttavia, la scoperta che la velocità della luce risultava essere la stessa per ogni osservatore, senza importare come stesse muovendosi questo, condusse alla teoria della relatività, ed in questa doveva abbandonarsi l'idea che c'era un tempo assoluto unico. Invece di ciò, ogni osservatore avrebbe la sua propria misura del tempo che sarebbe la registrata per un orologio che egli portasse con sé: orologi corrispondenti a differenti osservatori non coinciderebbero necessariamente. In questo modo, il tempo si trasformò in un concetto più personale, relativo all'osservatore che lo misurava.

Quando si cercava di unificare la gravità con la meccanica quantica dovette introdurre l'idea di tempo "immaginario." Il tempo immaginario è indistinguibile delle direzioni spaziali. Se uno può andare verso il nord, può fare anche il giro e dirigersi verso il sud; della stessa forma, se uno può andare in avanti nel tempo immaginario, dovrebbe potere fare anche il giro ed andare all'indietro. Questo significa che non può avere in avanti nessuna differenza importante tra le direzioni ed all'indietro del tempo immaginario. Al contrario, nel tempo "reale", c'è in avanti una differenza molto grande tra le direzioni ed all'indietro, come tutti sappiamo. Da dove proviene questa differenza tra il passato ed il futuro? Perché ricordiamo il passato ma non il futuro?

Le leggi della scienza non distinguono tra il passato ed il futuro. Con più precisione, come si spiegò anteriormente, le leggi della scienza non si modificano sotto la combinazione delle operazioni, o simmetrie, conoscenti come C, P e T., C significa cambiare particelle con antipartículas. P significa prendere l'immagine osservare, in modo che sinistra e destra si scambiano. T significa investire la direzione di movimento di tutte le particelle: in realtà, eseguire all'indietro il movimento. Le leggi della scienza che governano il comportamento della materia in tutte le situazioni normali non si modificano da sole sotto la combinazione delle due operazioni C e P. In altre parole, la vita sarebbe esattamente la stessa per gli abitanti di un altro pianeta che fosse immagini osservassi di noi e che fosse fatti di antimateria invece di materia.
Se le leggi della scienza non possono modificarsi per la combinazione delle operazioni C e P, e neanche per la combinazione C, P e T, devono anche rimanere inalterate sotto l'operazione T solo. Nonostante tutto, c'è in avanti una gran differenza tra le direzioni ed all'indietro del tempo reale nella vita ordinaria. Immagini un bicchiere di

acqua cadendo da un tavolo e rompendosi in pezzi nel suolo. Se lei lo filma in film, può dire facilmente se sta essendo proiettata in avanti o all'indietro. Se la proietta all'indietro vedrà improvvisamente i pezzi riunirsi del suolo e saltare all'indietro per formare un bicchiere intero sul tavolo. Lei può dire che il film sta essendo proiettata all'indietro perché questo tipo di comportamento non si osserva mai nella vita ordinaria. Se si osservasse, i fabbricanti di stoviglie perderebbero il commercio.

La spiegazione che si dà solitamente di perché non vediamo bicchieri rotti ricomponendosi essi soli nel suolo e saltando all'indietro sul tavolo, è che lo proibisce la seconda legge della termodinamica. Questa legge dice che in qualunque sistema chiuso il disordine, o l'entropia, aumenta sempre col tempo. In altre parole, si tratta di una forma della legge di Murphy: le cose tendono sempre ad andare male! Un bicchiere intatto sopra ad un tavolo è un stato di ordine elevato, ma un bicchiere rotto nel suolo è un stato disordinato. Può andare via dal bicchiere che sta sul tavolo nel passato fino al bicchiere rotto nel suolo nel futuro, ma non così alla rovescia.

Quello che aumenti il disordine col tempo o l'entropia è un esempio di quello che si chiama una freccia del tempo, qualcosa che distingue il passato del futuro dando una direzione al tempo. Ci sono almeno tre frecce del tempo differente.  Innanzitutto, sta la freccia termodinamica, che è la direzione del tempo nel quale il disordine o l'entropia aumentano. Quindi sta la freccia psicologica. Questa è la direzione nella quale noi sentiamo che passa il tempo, la direzione nel che ricordiamo il passato ma non il futuro. Finalmente, sta la freccia cosmologica. Questa è la direzione del tempo nel quale l'universo si sta espandendo invece di contrarsisi.

In questo capitolo discuterò come la condizione che non ci sia frontiera per l'universo, insieme al principio antrópico debole, può spiegare perché le tre frecce segneranno nella stessa direzione e, inoltre, perché deve esistere una freccia del tempo ben definita. Argomenterò che la freccia psicologica è determinata per la freccia termodinamica, e che entrambe le frecce segnano sempre necessariamente nella stessa direzione. Se si ammette la condizione che non ci sia frontiera per l'universo, vedremo che devono esistere frecce termodinamica e cosmologica del tempo ben definite, ma che non mireranno nella stessa direzione durante tutta la storia dell'universo. Nonostante ragionerò che unicamente quando segnano nella stessa direzione è quando le condizioni sono adeguate per lo sviluppo di esseri intelligenti che possano farsi la domanda: perché aumenta il disordine nella stessa direzione del tempo nel quale l'universo si espande?

Mi riferirò in primo luogo alla freccia termodinamica del tempo. La seconda legge del termodinamica posto vacante del fatto che ci sono sempre molti più stati disordinati che ordinati. Per esempio, consideriamo i pezzi di un puzzle in una scatola. C'è un ordine, e solo uno, nel quale i pezzi formano un'immagine completa. D'altra parte, c'è

un numero molto grande di disposizioni nel quale i pezzi sono disordinate e non formano un'immagine.

Supponiamo che un sistema comincia in uno di tra il piccolo numero di stati ordinati. Man mano che il tempo passa il sistema evolverà di accordo con le leggi della scienza ed il suo stato cambierà. In una volta posteriore è più probabile del sistema stia in un stato disordinato che in uno ordinato, poiché ci sono molti più stati disordinati. In questo modo, il disordine tenderà ad aumentare col tempo se il sistema era soggetto ad una condizione iniziale di ordine elevato.

Immaginiamo che i pezzi del puzzle stanno inizialmente in una scatola nella disposizione ordinata nella quale formano un'immagine. Se si agita la scatola, i pezzi acquisiranno probabilmente un altro ordine che sarà, una disposizione disordinata nella quale i pezzi non formano un'immagine propriamente detta, semplicemente perché ci sono moltissime più disposizioni disordinate. Alcuni gruppi di pezzi possono fare ancora parti corrette dell'immagine, ma quanto più si agiti la scatola tanto più probabile sarà che quelli gruppi si disfino e che i pezzi si trovino in un stato completamente vivace, nel quale non formino nessun tipo di immagine. Pertanto, il disordine dei pezzi aumenterà probabilmente col tempo se i pezzi obbediscono alla condizione iniziale a cominciare con un ordine elevato.

Supponga Lei, tuttavia, che Dio decise che l'universo deve finire in un stato di ordine elevato senza importare di che stato partisse. Nei primi momenti, l'universo sarebbe stato probabilmente in un stato disordinato. Questo significherebbe che il disordine diminuirebbe col tempo. Lei vedrebbe bicchieri rotti, ricomponendosi essi soli e saltando verso il tavolo. Tuttavia, nessun essere umano che stesse osservando i bicchieri starebbe vivendo in un universo nel quale il disordine diminuisse col tempo. Ragionerò che tali esseri avrebbero una freccia psicologica del tempo che starebbe mirando all'indietro. Questo è, essi ricorderebbero eventi nel futuro e non ricorderebbero eventi nel passato. Quando il bicchiere fosse rotto lo ricorderebbero recompuesto sul tavolo, ma quando stesse recompuesto sul tavolo non lo ricorderebbero stando nel suolo.

È abbastanza difficile parlare della memoria umana, perché non conosciamo come funziona il cervello in dettaglio. Lo conosciamo tutto, tuttavia, ecceda come funzionano le memorie di computer. Discuterò pertanto la freccia psicologica del tempo per computer. Credo che sia ragionevole ammettere che la freccia per computer è la stessa che per umani. Se non lo fosse, potrebbe aversi un gran successo finanziario nella borsa possedendo un computer che ricordasse le quotazioni di domani!

Una memoria di computer consiste essenzialmente in un dispositivo che contiene elementi che possono esistere in uno chiunque di due stati. Un esempio semplice è un

abaco. Nella sua forma più semplice, questo consiste in vari fili; in ogni filo c'è un conto che può mettersi in una di due posizioni.

Prima che un numero sia registrato in una memoria di computer, la memoria sta in un stato disordinato, con probabilità uguali per i due stati possibili. , I conti dell'abaco sono disperse aleatoriamente nei fili dell'abaco.  Dopo che la memoria interactúa col sistema a ricordare, starà chiaramente in un stato o nell'altro, come sia lo stato del sistema. , Ogni conta dell'abaco starà alla sinistra o la destra del filo dell'abaco.  In questo modo, la memoria ha passato di un stato disordinato ad uno ordinato.  Tuttavia, per essere sicuri che la memoria sta nello stato corretto è necessario spendere una certa quantità di energia, per muovere il conto o per azionare il computer, per esempio. Questa energia si dissolve in forma di caldo, ed aumenta la quantità di disordine nell'universo. Può dimostrarsi che questo aumento del disordine è sempre maggiore che l'aumento dell'ordine nella propria memoria. Così, il caldo espulso per il refrigeratore del computer assicura che quando registra un numero nella memoria, la quantità totale di disordine nell'universo aumenta nonostante tutto.  La direzione del tempo nella quale un computer ricorda il passato è la stessa che quello nel quale il disordine aumenta.

Il nostro senso soggettivo della direzione del tempo, la freccia psicologica del tempo, sta determinato pertanto dentro il nostro cervello per la freccia termodinamica del tempo. Esattamente come un computer, dobbiamo ricordare le cose nell'ordine in cui l'entropia aumenta. Questo fa che la seconda legge della termodinamica sia, quasi triviale. Il disordine aumenta col tempo perché noi misuriamo il tempo nella direzione nella quale il disordine cresce. Non si può fare una scommessa più sicura di questa! Ma perché deve esistere almeno la freccia termodinamica del tempo? o, in altre parole, perché deve stare l'universo in un stato di ordine elevato in un estremo del tempo, l'estremo che chiamiamo il passato? Perché non sta in un stato di completo disordine in ogni momento? Dopo tutto, questo potrebbe sembrare più probabile. E perché la direzione del tempo nella quale il disordine aumenta è la stessa nella quale l'universo si espande?

Nella teoria classica della relatività generale non può predirsi come avrebbe cominciato l'universo, poiché tutte le leggi conosciute della scienza avrebbero ceduto nella singolarità del *big bang.* L'universo avrebbe potuto incominciare in un stato molto soave ed ordinato. Questo avrebbe condotto ad alcune frecce termodinamica e cosmologica del tempo ben definite, come osserviamo.  Ma ugualmente avrebbe potuto cominciare in un stato molto grumoso e disordinato. In quello caso, l'universo starebbe già in un stato di disordine completo, in modo che il disordine non potrebbe aumentare col tempo. 0 rimarrebbe bene costante, nel qual caso non ci sarebbe freccia termodinamica del tempo ben definita, oppure diminuirebbe, nel qual caso la freccia termodinamica del tempo segnalerebbe in direzione opposta alla freccia cosmologica. Nessuna di queste possibilità è di accordo con quello che osserviamo.

Tuttavia, come abbiamo visto, la relatività generale classica predice la sua propria rovina. Quando la curvatura dello spazio-tempo diventa grande, gli effetti gravitazionali quantici diventeranno importanti, e la teoria classica smetterà di costituire una buona descrizione dell'universo.  Deve usare si unisca teoria quantica della gravità per comprendere come cominciò l'universo.

In una teoria quantica della gravità, come vedemmo nel capitolo anteriore, per specificare lo stato dell'universo bisognerebbe dire ancora come si comporterebbero le storie possibili dell'universo nel passato nella frontiera dello spazio-tempo.  Questa difficoltà di dovere descrivere quello che non si sa, né può sapersi, potrebbe evitarsi unicamente se le storie soddisfacessero la condizione che non ci sia frontiera: sono finite in estensione ma non hanno antistanti, bordi o singolarità. In questo caso, il principio del tempo sarebbe un punto regolare, soave, dello spazio-tempo, e l'universo avrebbe cominciato la sua espansione in un stato molto soave ed ordinato.  Non sarebbe potuto essere completamente uniforme, perché ciò violerebbe il principio di incertezza della teoria quantica. Dovrebbe c'essere state piccole fluttuazioni nella densità e nelle velocità delle particelle. La condizione che non ci sia frontiera, tuttavia, implicherebbe che queste fluttuazioni sarebbero tanto piccole come fosse possibile, pur di essere consistenti col principio di incertezza.

L'universo avrebbe cominciato con un periodo di espansione esponenziale o "inflazionario", nel quale avrebbe aumentato il suo volume in un fattore molto grande. Durante questa espansione le fluttuazioni nella densità sarebbero rimaste piccole all'inizio, ma posteriormente avrebbero incominciato a crescere. Le regioni nelle quali la densità fosse leggermente più alta che la calza avrebbero visto frenata la sua espansione per l'attrazione gravitazionale della massa extra. Finalmente, tali regioni smetterebbero di espandersi e collasserebbero per formare galassie, stelle ed esseri come noi. L'universo, al principio in un stato soave ed ordinato, diventerebbe grumoso e disordinato man mano che il tempo passasse. Quello che spiegherebbe l'esistenza della freccia termodinamica del tempo.

Ma che cosa succederebbe, e quando, se l'universo smettesse di espandersi ed incominciasse a contrarsisi? Si investirebbe la freccia termodinamica, ed il disordine incomincerebbe a diminuire col tempo? Questo porterebbe ad ogni tipo di possibilità di fantascienza per la gente che sopravvivesse la fase in espansione ed arrivasse fino alla fase in contrazione. Vedrebbero bicchieri rotti ricomponendosi essi soli nel suolo e saltando sul tavolo? Sarebbero capaci di ricordare le quotazioni di domani e fare una fortuna nella borsa? Potrebbe sembrare qualcosa accademico preoccuparsi circa quello che succederebbe quando l'universo Lei collassasse di nuovo, poiché non incomincerà a contrarsisi almeno durante altri diecimila milioni di anni. Ma esiste una strada più rapida per verificare che cosa succederebbe: saltare dentro un buco nero. Il collasso di una stella per formare un buco nero è abbastanza simile alle ultime tappe

del collasso di tutto l'universo. Pertanto se il disordine diminuisca nella fase contractiva dell'universo, potrebbe aspettarsi anche che diminuisse dentro un buco nero. In questo modo, forse un astronauta che cadesse in uno sarebbe capace di fare denaro nella roulette ricordando dove la palla fu prima che egli facesse la sua scommessa. , Sfortunatamente, tuttavia, non avrebbe tempo di giocare prima di trasformarsi in *spaghetti.* Né sarebbe capace di dirci niente circa l'investimento della freccia termodinamica, né di depositare i suoi guadagni, perché sarebbe acchiappato dietro l'orizzonte di eventi del buco nero.

Al principio, io credei che il disordine diminuirebbe quando l'universo Lei collassasse di nuovo. Pensava che l'universo doveva ritornare ad un stato soave ed ordinato quando Lei facesse piccolo un'altra volta. Ciò significherebbe che la fase contractiva sarebbe come l'investimento temporaneo della fase espansiva. La gente nella fase contractiva vivrebbe all'indietro le sue vite: morrebbero prima di nascere e ringiovanirebbero conforme l'universo Lei contraesse.

Questa idea è attraente perché implica una bella simmetria tra le fasi espansiva e contractiva. Tuttavia, non può essere adottata sola, indipendente di altre idee sull'universo. La questione è: si deduce questa idea dalla condizione che non ci sia frontiera, o è inconsistente con quella condizione? Come dissi, all'inizio pensai che la condizione di non frontiera implicherebbe in realtà che il disordine diminuirebbe nella fase contractiva. Giunsi ad una conclusione erronea in parte per l'analogia con la superficie della Terra. Se si fa concordare il principio dell'universo col polo nord, allora il fine dell'universo dovrebbe essere simile all'inizio, dello stesso modo che il polo meridionale è simile al nord. Tuttavia, i poli nord e sud corrispondono all'inizio ed alla fine dell'universo nel tempo immaginario. Il principio ed egli termine nel tempo reale possono essere molto differenti l'uno dell'altro.  Mi depistò anche il lavoro che io avevo fatto su un modello semplice dell'universo, nel quale la fase colapsante somigliava all'investimento temporaneo della fase espansiva. Tuttavia, un mio collega, Don Page, dell'Università di Penn State, segnalò che la condizione che non ci sia frontiera non esigeva che la fase contractiva fosse necessariamente l'investimento temporaneo della fase espansiva. Inoltre, uno dei miei alunni, Raymond Laflamme, trovò che in un modello leggermente più complicato il collasso dell'universo era molto differente dell'espansione.  Mi resi conto che aveva commesso un errore: la condizione che non ci sia frontiera implicava che il disordine continuerebbe in realtà aumentando durante la contrazione. La frecce termodinamica e psicologica del tempo non si investirebbero quando l'universo cominciasse a contrarsisi di nuovo, o dentro i buchi neri.

Che cosa si deve fare quando uno si rende conto che ha commesso un errore come quello? Alcuni non ammettono mai che si sbagliano e continuano cercando nuovi argomenti, spesso inconsistenti, per appoggiare la sua tesi, come fece Eddington opporsisi alla teoria dei buchi neri. Altri pretendono, in primo luogo, non avere

appoggiato mai realmente la messa a fuoco scorretta o che, se lo fecero, fu solo per dimostrare che era inconsistente. Mi sembra molto meglio e meno confuso se si ammette in carta stampata che si sbagliava. Un buon esempio lo costituì Einstein chi chiamò alla costante cosmologica che aveva introdotto quando stava tentando di costruire un modello statico dell'universo, l'errore più grande della sua vita.

Ritornando alla freccia del tempo, ci rimane la domanda: perché osserviamo che la frecce termodinamica e cosmologica segnalano nella stessa direzione? o in altre parole perché aumenta il disordine nella stessa direzione del tempo nel quale l'universo si espande? Se si pensa che l'universo si espanderà e che dopo si contrarsi di nuovo, come la proposta di non frontiera sembra implicare, sorge la questione di perché dobbiamo stare nella fase espansiva invece di nella fase contractiva. Questa questione può rispondersi seguendo il principio antrópico debole. Le condizioni nella fase contractiva non sarebbero adeguate per l'esistenza di esseri intelligenti che potesse farsi la domanda: perché è maggiorato il disordine nella stessa direzione del tempo nel quale l'universo si sta espandendo? L'inflazione nelle tappe precoci dell'universo che la proposta di non frontiera predice, significa che l'universo deve stare espandendosi ad una velocità molto prossima alla velocità critica alla quale eviterebbe di collassare di nuovo, ed in questo modo non collasserà per molto tempo. Per tutte le stelle allora si saranno scottati, ed i protoni ed i neutroni si saranno disintegrati probabilmente in particelle leggere e radiazione. L'universo starebbe in un stato di disordine quasi completo. Non ci sarebbe nessuna freccia termodinamica chiara del tempo. Il disordine non potrebbe aumentare molto poiché l'universo starebbe già in un stato di disordine quasi completo. Tuttavia, una freccia termodinamica chiara è necessaria affinché la vita intelligente funzioni. Per sopravvivere, gli esseri umani devono consumare alimento che è una forma ordinata di energia, e trasformarlo in caldo che è una forma disordinata di energia. Pertanto, la vita intelligente non potrebbe esistere nella fase contractiva dell'universo. Questa è la spiegazione di perché osserviamo che la frecce termodinamica e cosmologica del tempo segnalano nella stessa direzione.  Non è che l'espansione dell'universo faccia che il disordine aumenti. Piuttosto si tratta che la condizione di non frontiera fa che il disordine aumenti e che le condizioni siano adeguate per la vita intelligente solo nella fase espansiva.

Per riassumere, le leggi della scienza non distinguono in avanti tra le direzioni ed all'indietro del tempo. Tuttavia, ci sono almeno tre frecce del tempo che sì distinguono il passato del futuro. Sono la freccia termodinamica, la direzione del tempo nella quale il disordine aumenta; la freccia psicologica, la direzione del tempo secondo la quale ricordiamo il passato e non il futuro; e la freccia cosmologica, la direzione del tempo nella quale l'universo si espande invece di contrarsisi. Ho mostrato che la freccia psicologica è essenzialmente la stessa che la freccia termodinamica, in modo che le due segnaleranno sempre nella stessa direzione. La proposta di non frontiera per

l'universo predice l'esistenza di una freccia termodinamica del tempo ben definita, poiché l'universo dovette cominciare in un stato soave ed ordinato. E la ragione che osserviamo che questa freccia termodinamica coincide con la freccia cosmologica è che esseri intelligenti possono esistere solo nella fase espansiva. La fase contractiva sarebbe inadeguata poiché non possiede una freccia termodinamica chiara del tempo. Il progresso della razza umana nella comprensione dell'universo ha creato sempre di più un piccolo angolo di ordine in un universo disordinato. Se lei ricorda ogni parola di questo libro, la sua memoria avrà registrato circa due milioni di unità di informazione: l'ordine nel suo cervello avrà aumentato approssimativamente due milioni di unità. Tuttavia, mentre lei sta leggendo il libro, avrà convertito almeno mille calorie di energia ordinata, in forma di alimento, in energia disordinata, in forma di caldo che lei cede all'aria della sua periferia attraverso convenzione e sudore. Questo aumenterà il disordine dell'universo in circa venti miliardi di miliardi di unità - o approssimativamente dieci milioni di miliardi di volte l'aumento per ordine del suo cervello e quello se lei ricorda *tutto* quello che c'è in questo libro. Nel prossimo capitolo tenterò di aumentare un po' più l'ordine di quell'angolo, spiegando come si sta tentando di accoppiare le teorie parziali che ho descritto per formare una teoria unificatrice completa che lo spiegherebbe tutto nell'universo.

# Capitolo 10

## WORM'S HOLE  E VIAGGI NEL TEMPO 3

Nel capitolo anteriore discutiamo per che vediamo che il tempo va in avanti: per che il disordine aumenta e per che ricordiamo il passato ma non il futuro. Trattavamo il tempo come se fosse una linea di treno retta per la quale suolo può andare via in una direzione o nell'opposta.

Ma che succederebbe se la linea di treno avesse boccoli e ramificazioni in modo che un treno potesse, andando sempre in avanti, ritornare ad una stazione per la quale ha passato già? In altre parole, seria possibile che qualcuno potesse viaggiare al futuro o il passato?

H. G. Wells in La macchina del tempo esploro queste possibilità, come hanno fatto altri innumerabili scrittori di fantascienza. Ma molte delle idee di fantascienza, come i sottomarini o i viaggi alla Luna, si sono convertiti in fatti scientifici. Perciò quali sono le prospettive dei viaggi nel tempo?

La prima indicazione che le leggi della fisica potrebbero permettere realmente i viaggi nel tempo si prodursi in 1949 quando Kurt Gödel scoprì un nuovo spazio-tempo permesso per la teoria della relatività. Gödel fu un matematico che diventò famoso dimostrando che è impossibile provare tutte le affermazioni vere, perfino se ci limitassimo a tentare di provare quelle di una materia tanto apparentemente sicura come l'aritmetica. Come il principio di incertezza, il teorema di incompletitud di Gödel può essere una limitazione fondamentale nella nostra capacità di capire e predire l'universo, ma fino ad ora non sembra almeno essere stato un ostacolo nella nostra ricerca di una teoria unificatrice completa.

Originalmente questo capitolo non appare in "Storia" del Tempo. Fu aggregato in una versione posteriore che si pubblicò dovuto al successo della prima parte.
Gödel imparò la teoria della relatività generale quando, insieme ad Einstein, passò gli ultimi anni della sua vita nell'Istituto di Studi Avanzati di Princeton. Il suo spazio-tempo possedeva la curiosa proprietà che l'universo completo stava ruotando. Uno potrebbe domandarsi << Ruotando rispetto a che cosa? >>. La risposta è che la materia distante ruoterebbe rispetto alle direzioni nelle quali segnalano le trottole o i giróscopos.

Questo implica l'effetto laterale che sarebbe possibile che qualcuno uscisse in un'imbarcazione spaziale e girasse alla Terra prima di avere staccato. Questa

proprietà preoccupò Einstein che credeva che la relatività generale che trovò non permetterebbe i viaggi nel tempo. Tuttavia, dati gli antecedenti di Einstein di opposizioni infondate al collasso gravitazionale ed all'inizio di incertezza, magari questo fosse un segno incoraggiante. La soluzione che trovò Gödel non corrisponde all'universo nel quale viviamo, perché possiamo dimostrare che l'universo non gira. Possiede anche un valore non nullo della costante cosmologica che Einstein introdusse quando credeva che l'universo rimaneva invariabile. Una volta che Hubble scoprì l'espansione dell'universo, non aveva necessità di una costante cosmologica, ed oggigiorno la crencia generalizzata è che il suo valore è zero. Tuttavia, si sono sentiti nuovi e ma ragionevoli spazio-tempi compatibili con la relatività generale e che permettono di viaggiare al passato. Uno di essi è l'interno di un buco nero in rotazione. Un altro è un spazio-tempo che contiene due sagge cos-miche in movimento che si incrociano ad alta velocità. Come suggerisce il suo nome, le sagge cos-miche sono oggetti simili ad archi nel senso che la sua sezione è molto minore della sua longitudine. In realtà, sono ma bene come strisce di gomma perché sono sommesse a tensioni enormi, dell'ordine di milioni di milioni di milioni di milioni di tonnellate. Una corda cosmica unita alla Terra potrebbe accelerarla da 0 a 100 km/h nella trentesimo parte di un secondo. Gli archi cosmici possono sembrare pura fantascienza, ma ci sono ragioni per credere che avrebbero potuto formare nei primi istanti dell'universo come risultato di una rottura di simmetria simile a quelle discusse in quello capitolo 5. Poiché starebbe basse tensioni enormi e potevano incominciare in una configurazione chiunque, sarebbero capaci di affrettarsi fino a velocità alte dirigendosi.

La soluzione di Gödel e lo spazio-tempo degli archi cosmici cominciano tanto distorti che il viaggio al passato è sempre possibile. Dio avrebbe potuto creare un universo così ricurvo, ma non possediamo ragioni per pensare che lo facesse. Le osservazioni del fondo di microonde e della gran quantità di elementi leggeri indicano che l'universo primitivo non possedeva il tipo di curvatura necessario per permettere i viaggi nel tempo. Alla stessa conclusione si arriva teoricamente a partire dalla proposta di non esistenza di antistante. Così, la domanda è: se l'universo incomincia senza la classe di curvatura richiesta per viaggiare nel tempo, possiamo curvare posteriormente quanto basta regioni concrete dello spazio-tempo come per permetterlo?

Un problema Intimamente relazionato e che concerne anche agli scrittori di fantascienza sono i viaggi interstellari o intergalattiche rapide. Di accordo con la relatività, niente può viaggiare più rapido della luce. Se, pertanto, inviamo un'imbarcazione spaziale alla nostra stella ma vicina, Alfa Centauro, dovremmo sperare come minimo otto ani affinché i viaggiatori potessero ritornare e dirci quello che trovarono. Se la spedizione fosse al centro della galassia, passerebbero come minimo cento mille ani prima che ritornassero. La teoria della relatività ci permette una consolazione, denominata la paradosso dei gemelli menzionata in quello capitolo 2.

Poiché non c'è un standard unico del tempo, ma ogni osservatore possiede il suo proprio tempo, misurato per un orologio che porta con quello, è possibile che il viaggio sembri molto ma taglio i viaggiatori spaziali che a quelli che rimangono in Terra. Ma non seria molto gradevole ritornare di un viaggio spaziale con alcuni ani di ma e comprovare che qui tutti quelli che lasciamo erano morti da migliaia di ani. Così, col fine di attrarre l'interesse dei suoi lettori, gli scrittori di fantascienza devono supporre che qualche giorno scopriremo come viaggiare ma rapido che la luce. Quello che la maggioranza di quelli scrittori non sembra avere scoperto è che se uno può viaggiare ma rapido che la luce, allora la relatività implica queunotambién può dietro viajarhacia nel tempo, talcomo ci dice il seguente poker umoristico:

*Érase una volta una giovane di Wight*
*che viaggiava più rapido del / uz.*
*Ella un giorno partì,*
*di forma relativa,*
*e la notte anteriore arrivò.*

La chiave sta in che la teoria dc la relatività ci dice che non c'è un'unica maniera di misurare il tempo col quale tutti gli osservatori staranno dc accordo. Al contrario, ogni osservatore possiede la sua propria misura del tempo.

Orbene, se un razzo che viaggi sotto la velocità dc la luce può andare di un evento A, diciamo, il fine della corsa di 100 metri dei Giochi Olimpici del 2012, ad un evento B, diciamo, l'apertura della 100.004 riunione del Congresso di Alfa Centauro, allora tutti gli osservatori coincideranno in che l'evento A succedè prima che l'evento B di accordo coi suoi tempi rispettivi. Supponiamo, tuttavia, che l'imbarcazione spaziale dovesse viaggiare ma rapido che la luce per portare il risultato della corsa al Congresso. Allora, osservatori che si muovano con velocità differenti non potrebbero coincidere in se l'evento A succedè prima che B o viceversa. Di accordo col tempo di un osservatore in riposo con rispetto alla Terra, il Congresso comincerebbe dopo la corsa. Così, questo osservatore penserebbe che un'imbarcazione spaziale potrebbe arrivare in tempo di Ad a B purché potesse ignorare quello limiti della velocità della luce. Tuttavia, un osservatore in Alfa Centauro che si stesse allontanando dalla Terra a cAsí la velocità della luce direbbe che l'evento B, l'apertura del Congresso, succedè prima che quello A, la corsa di 100 metri La teoria della relatività ci dice che le leggi della scheda devono essere le stesse per osservatori che si muovono a velocità differenti.

Questo è stato adeguatamente comprovato per esperimenti e è probabile che continui perfino ad essere valido se si trova una teoria ma avamposto che rimpiazzi alla relatività. Così, l'osservatore in movimento direbbe che se fosse possibile viaggiare ma rapido che la luce, dovrebbe essere possibile arrivare dall'evento B, l'apertura del Congresso, all'evento A, la corsa di 100 metri. Se uno fuori leggermente ma rapido,

fino a potrebbe ritornare prima della corsa e scommettere essendo sicuro di chi sarebbe il vincitore.

Esiste un problema con la rottura della barriera della velocità della luce. La teoria della relatività ci dice che la potenza del razzo necessaria per accelerare l'imbarcazione spaziale aumenta ogni volta ma conformi c'avviciniamo alla velocità della luce. Abbiamo evidenze sperimentali di ciò, non con imbarcazioni spaziali, ma se con particelle elementari negli acceleratori di particelle come quello del Fermilab o quello del CERN (Centro Europeo per l'ricerca Nucleare . Possiamo accelerare particelle fino ad un 99,99 per 100 della velocità della luce, ma, per molta più potenza che somministriamo loro, non possiamo fare che vadano ma là della barriera della velocità della luce. Uguale succede con le imbarcazioni spaziali: indipendentemente della potenza che somministriamo loro, non possono sbrigarsi mai al di sopra della velocità della luce.

Ciò supporrebbe scartare tanto i viaggi spaziali rapide come i viaggi all'indietro nel tempo. Tuttavia, esiste un scampo. Potrebbe succedere che fossimo capaci di piegare lo spazio-tempo di tale maniera che ci fosse una scorciatoia entri Ad e
B. Una forma di farlo sarebbe creando un buco di verme entri Ad e Come B. suggerisce il suo nome, un buco di verme è un tubo stretto di spazio-tempo che collega due regioni distanti cAsí piani. Non deve per esistere nessuna relazione tra la distanza attraverso il buco di verme e la separazione dei suoi estremi durante lo spazio-tempo cAsí piano, Così, uno potrebbe immaginarsi che potrebbe creare o trovare un buco di verme che portasse delle vicinanze del sistema solare ad Alfa Centauro. La distanza attraverso il buco di verme potrebbe essere di sola pochi milioni di kilometres malgrado la Terra ed Alfa Centauro stiano a quaranta milioni di milioni di chilometri di distanza nello spazio ordinario. Questo ci permetterebbe che le notizie sulla corsa di 100 metri arrivassero all'apertura del Congresso. Ma un osservatore che viaggiasse verso la Terra dovrebbe essere allora anche capace di trovare un altro buco di verme che gli permettesse di andare dell'apertura del Congresso in Alfa Centauro di giro alla Terra prima del principio della corsa. Così, i "worm's hole", come qualunque altra forma di viaggiare ma rapidamente che la luce, ci permetterebbero di viaggiare al passato.

L'idea dei "worm's hole" tra regioni differenti dello spazio-tempo non fu un'invenzione degli scrittori di fantascienza, ma provenne da fonti molto rispettabili.

In 1935 Einstein e Nathan Rosen scrissero un articolo in quello che mostravano che la relatività generale permette quello che essi denominarono "ponti", ma che ora si conoscono come "worm's hole". I ponti di Einstein-Rosen non duravano quanto basta come affinché un'imbarcazione spaziale potesse attraversarli: si trasformavano in una singolarità sgonfiandosi il buco di verme. Tuttavia, si è suggerito come fattibile che una

civiltà avanzata potesse mantenere aperto un buco di verme. Per ciò, o per piegare lo spazio-tempo di tale forma che permettesse i viaggi nel tempo, può dimostrarsi che si ha bisogno di una regione dell'espaciotiempo - con curvatura negativa, simile alla superficie di una sella. La materia ordinaria che possiede una densità di energia positiva, produce allo spazio-tempo una curvatura positiva, come quella della superficie di una sfera. Pertanto, per potere piegare lo spazio-tempo di tale maniera che ci permetta di viaggiare al passato, abbiamo bisogno di materia con una densità di energia negativa.

L'energia è in un certo modo come il denaro: se si domina un bilancio positivo, è possibile distribuirla di varie forme, ma, di accordo con le leggi classiche accettate fino a principi di secolo, non potrebbe rimanere in scoperto. Così, dette leggi classiche avrebbero scartato qualunque possibilità di viaggi nel tempo. Tuttavia, come si è descritto in capitoli anteriori, le leggi classiche furono soppiantate per leggi quantiche basate nel principio di incertezza. Le leggi quantiche sono ma liberali e permettono di stare in scoperto in un o due conti purché il bilancio totale sia positivo. In altre parole, la teoria quantica permette che la densità di energia sia negativa in alcuni posti, purché questo sia compensato con energia positiva in altri, in modo che l'energia totale sempre sia positiva. Un esempio di come la teoria quantica può permettere densità di energia negative ce lo proporziona il denominato effetto Cachemire. Come vedemmo nel capitolo 7, perfino quello che crediamo che è un spazio "vuoto" questo pieno di pari di particelle ed antipartículas virtuali che appaiono giunte, si separa, e tornano ad unirsi annichilendosi tra sé. Supponga Lei ora che abbiamo due placche metalliche parallele separate una piccola distanza. Le placche agissero come specchi per i fotoni o particelle di luce virtuali.

In realtà, formassero una cavità tra esse, qualcosa di simile ad un tubo di organo che risuonasse assolo per certe note. Questo significa che i fotoni virtuale assolo potranno esistere tra le placche se la distanza tra questi corrisponde ad un numero intero di longitudini di onda, la distanza tra creste successive di un'onda, dei fotoni. Se la larghezza della cavità è un numero intero di longitudini di onda ma una frazione di longitudine di onda, allora dopo alcuni riflessioni tra le placche, le creste di un'onda coincideranno con le valli di altre e le onde si cancelleranno.

Dato che i fotoni virtuali tra il placche assolo possono possedere una delle longitudini di onda risonanti, ci saranno alcuni meno che nella regione esterna alle placche dove i fotoni possono avere qualunque longitudine di onda. Pertanto, fotoni virtuali battessero ma sull'interno delle placche che ecceda l'esterno. È di aspettare l'esistenza di una forza tra le placche che tenterà di unire l'una con l'altra. Questa forza è stata misurata realmente e possiede il valore predetto. Perciò, abbiamo un'evidenza sperimentale che le particelle virtuali esistono e producono effetti reali.

Il fatto che faggio meno pari tra le placche significa che la densità di energia è minore del resto dello spazio. Ma la densità di energia totale nello spazio << vuoto >> lontano dalle placche deve essere zero, perché altrimenti la densità di energia curverebbe lo spazio che non sarebbe allora quasi piano. Così, se la densità di energia tra le placche deve essere minore della densità di energia lontano da esse, deve essere negativa.

In questo modo abbiamo evidenza sperimentale tanto che lo spazio-tempo può essere curvato, a partire dalla deviazione dei raggi di luce durante le eclissi, come che può essere curvato nella maniera necessaria affinché i viaggi nel tempo siano permessi, a partire dall'effetto Cachemire. Potrebbe sperarsi quindi che, come avanzamento la scienza e la tecnologia, siamo finalmente capaci di costruire una macchina del tempo. Ma se fosse Così, perché non è ritornato ancora nessuno del futuro e ci ha detto come costruirla? Potrebbero esistere buone ragioni affinché fosse imprudente fidarsi il segreto dei viaggi del tempo nel nostro stato primitivo di sviluppo, ma, a meno che la natura umana cambi radicalmente, è difficile credere che qualcuno visitatore del futuro non ci scoprisse la torta. Naturalmente, alcuni persone rivendicheranno che le visioni di Ufo sono evidenze che siamo visitati per alienígenas o per gente del futuro. , Se gli alienígenas dovesse arrivare in una volta ragionevole, dovrebbero potere viaggiare ma rapido che la luce, per quello che le due possibilità possono essere equivalenti.

Tuttavia, credo che qualunque visita di alienígenas o genti del futuro seria molto più evidente e, probabilmente, molto più scomoda. Se essi decidessero revelársenos, perché farlo solo a quelli che non sono considerate testimoni affidabili? Se stanno tentando di notarci di qualche gran pericolo, non stanno essendo molto effettivi.

Una forma possibile di spiegare l'assenza di visitatori del futuro seria dire che il passato è fisso perché l'abbiamo osservato ed abbiamo comprovato che non ha il tipo di curvatura necessario per permettere di viaggiare all'indietro dal futuro. Al contrario, il futuro è ignorato e questo aperto, in modo che potrebbe avere la curvatura - richiesta. Ciò significherebbe che qualunque viaggio nel tempo sarebbe confinato al futuro. Non ci sarebbe nessuna possibilità che il capitano Kirk e l'imbarcazione spaziale Enterprise si presentasse nel momento attuale.

Questo potrebbe spiegare per che nonostante non siamo stati invasi da turisti del futuro, ma non eviterebbe i problemi che sorgerebbero se uno fosse capace di ritornare dietro e cambiare la storia. Supponga Lei, per esempio, che una persona ritornasse ed ammazzasse suo trisnonno quando questo nonostante fuori un bambino. Ci sono molte versioni di questo paradosso, ma tutte sono essenzialmente equivalenti: si arriva a contraddizioni se si tiene la libertà di potere cambiare il passato.

Sembra c'essere due possibili soluzioni ai paradossi che sorgono dai viaggi nel tempo. Alla prima la denominerò proposta delle storie consistenti. Ci dice che perfino se lo spazio-tempo questo ricurvo in modo che sia possibile viaggiare al passato, quella che succeda in quello deve essere una soluzione consistente delle leggi fisiche. Di accordo con questo punto di vista, non potrebbe retrocedersi nel tempo a meno che la storia mostrasse che uno è arrivato già nel passato e che, mentre stette lì, non ammazzò suo trisnonno o realizzi qualunque altra azione che entrasse in conflitto con la sua situazione attuale. Inoltre, quando diventasse, non seria capace di cambiare la storia scritta. Quello significa che non si terrebbe la libertà di fare quello che si amasse. Naturalmente, si può dire che la libertà è in qualsiasi caso un'illusione. Se veramente esistesse una teoria completa che lo governasse tutto, determinerebbe anche presumibilmente le nostre azioni. Ma farebbe questo in modo che noi seria impossibile potere calcolare il risultato per un organismo tanto complicato come un essere umano. La ragione per la quale diciamo che gli esseri umani hanno libertà propria è perché non possiamo predire quello che faranno. Tuttavia, se un essere umano andasse via in un razzo e girasse prima di essere uscito, allora se che saremmo capaci di predire quello che l'o ella farebbero perché seria parte della storia registrata. Così, in quella situazione, il viaggiatore del tempo non avrebbe libertà di fare quello che volesse.

L'altra forma possibile di risolvere i paradossi dei viaggi nel tempo potremmo denominarla l'ipotesi delle storie alternative. Qui l'idea è che quando i viaggiatori del tempo ritornano al passato, essi introducono storie alternative che differiscono della storia registrata. In questo modo essi possono agire liberamente, senza la restrizione di consistenza con la storia previa. Steven Spielberg si divertì con questa idea nei film del serie *Ritorno al futuro:* Marty McFly fu capace di ritornare al passato e cambiare la relazione tra i suoi genitori ad una situazione ma soddisfacente.

L'ipotesi delle storie alternative somiglia al modo di Richard Feynman di esprimere la teoria quantica come una somma di storie, descritto nei capitoli 4 e 8. Questo ci dice che l'universo non è un'unica storia, ma contiene tutte le storie possibili, ognuna di esse con la sua propria probabilità. Tuttavia, sembra esistere una differenza importante tra la proposta di Feynman e quella delle storie alternative. Nella somma di Feynman, ogni istoria è un spazio-tempo completo con tutto compreso in quello. Lo spazio-tempo può essere tanto ricurvo che sia possibile viaggiare con un razzo al passato. Ma il razzo farebbe parte dello stesso spazio-tempo e, pertanto, della stessa storia, che dovrebbe essere consistente. Così, la proposta di Feynman di somma di storie sembra appoggiare l'ipotesi delle storie consistenti ma che quella delle storie alternative.

La somma di storie di Feynman permette di viaggiare al passato ad una scala microscopica. Nel capitolo 9 vedemmo che le leggi della scienza sono invariabili davanti a combinazioni delle operazioni C, P e T. Questo significa che un'antipartícula

che gira nel senso contrario a quello degli aghi dell'orologio e va di Ad a B può essere vista anche come una particella ordinaria che gira nel senso degli aghi dell'orologio e che va all'indietro nel tempo di B ad A. Di forma simile, una particella ordinaria che si muove in avanti nel tempo è equivalente ad un'antipartícula che si muove all'indietro nel tempo. Come abbiamo discusso in questo capitolo ed in quello capitolo 7, lo spazio "vuoto" questo pieno di pari di particelle ed antipartículas virtuali che si credano giunte, si separa e tornano ad unirsi annichilendosi tra sé.

Uno può immaginarsi il paio di particelle come un'unica particella che si muove in un boccolo chiuso nello spazio-tempo. Quando si muove in avanti nel tempo, dall'evento in che si creda fino a nel che si annichilisce, si denomina particella. Ma quando la particella viaggia all'indietro nel tempo, dall'evento nel che il paio si annichilisce fino a nel che si creda, si dice che si tratta di un'antipartícula che viaggia in avanti nel tempo.

La spiegazione di come i buchi neri possono emettere particelle e radiazione, data in quello capitolo 7, fu che un componente di una pari partícula/antipartícula virtuale, diciamo, l'antipartícula, può cadere nel buco nero, lasciando all'altro componente senza un compagno col che annichilirsi. La particella abbandonata può cadere ugualmente nel buco, ma può scappare anche dall'ambiente del buco nero. Se questo succede, ad un osservatore distante gli sembrerà che una particella sia emessa per il buco nero. Si può, tuttavia, adottare una visione differente, ma equivalente ed intuitiva, del meccanismo di emissione di un buco nero. Può considerare il componente del paio virtuale che cade al buco nero, diciamo, l'antipartícula, come una particella che viaggia all'indietro nel tempo ed esce dal buco. Quando arriva al punto nel quale la pari partícula/antipartícula virtuale si unisce, è disperso per il campo gravitazionale come una particella che viaggia in avanti nel tempo e scappa dal buco nero. Se al contrario fuori la particella componente del paio virtuale quella che cadesse nel buco, potrebbe considerarsi come un'antipartícula che viaggia all'indietro nel tempo ed esce dal buco. Perciò, la radiazione dei buchi nera dimostrazione che la teoria quantica permette di viaggiare all'indietro nel tempo a scala microscopica e che detti viaggi temporali possono produrre effetti osservabili.

È possibile pertanto domandarsi: permette la teoria quantica di viaggiare nel tempo a scala macroscopica di forma utilizzabile per la gente? A prima vista, sembra che dovesse essere così. La somma di storie di Feynman si suppone che è di *tutte* le storie. Per ciò dovrebbe includere storie nei che lo spazio-tempo questo tanto ricurvo che è possibile viaggiare al passato. Per che allora non ci sono presentati problemi con la storia? Supponga Lei, per esempio, che qualcuno sarebbe ritornato ed avrebbe dato ai nazisti il segreto della bomba atomica.

Questi problemi si eviterebbero se si verificasse quello che denomino congettura di protezione cronologica. Questo ci dice che le leggi della fisica cospirano per prevenire

che oggetti *macroscopici* trasportino informazione al passato. Come la congettura di censura cosmica, non è stato provata, ma esistono ragioni per pensare che è certo.

La ragione per credere che la protezione cronologica funziona è che quando lo spazio-tempo è il sufficientemente ricurvo come per fare possibili i viaggi al passato, le particelle virtuali che si muovono in boccoli o lacci chiusi nello spazio-tempo possono arrivare a trasformarsi in particelle reali che viaggiano in avanti nel tempo ad una velocità uguale o minore di quella della luce. Come pratiche particelle possono correre il boccolo un numero chiunque di volte, passeranno per ogni punto della strada molte volte. Così la sua energia sarà registrata un ed un'altra volta in modo che la densità di energia diventerà molto grande. Questo potrebbe produrre una curvatura positiva nello spazio-tempo, quello che permetterebbe i viaggi al passato. Ancora non questo chiaro se queste particelle produrrebbero una curvatura positiva o negativa o se la curvatura prodotta per alcuni classi di particelle virtuali potrebbe cancellarsi con la dovuta ad altre classi. Pertanto, la possibilità di viaggiare nel tempo continua ad essere una questione aperta. Ma non scommetterò su questa questione. Il mio rivale potrebbe avere l'ingiusto vantaggio di conoscere il futuro.

# Capitolo 11

## L'UNIFICAZIONE DELLA FISICA

Come vedemmo nel primo capitolo, sarebbe molto difficile costruire tutto d'un colpo una teoria unificatrice completa di tutto l'universo. Cosicché, invece di ciò, abbiamo fatto progressi per mezzi di teorie parziali che descrivono una gamma limitata di avvenimenti ed omettono altri o li avvicinano per mezzo di certi numeri. , La chimica, per esempio, ci permette di calcolare le interazioni tra atomi, senza conoscere la struttura interna del nucleo di un atomo. In ultima istanza, si tiene la speranza di trovare una teoria unificatrice, consistente, completa che includerebbe a tutte quelle teorie parziali come avvicinamenti, e che affinché quadrassero i fatti non dovrebbe essere regolata mediante la selezione dei valori di alcuni numeri arbitrari. La ricerca di una teoria come quella si conosce come "l'unificazione della fisica." Einstein usò la maggior parte dei suoi ultimi anni in cercare infruttuosamente questa teoria unificatrice, ma il momento ancora non era maturo: c'erano teorie parziali per la gravità e per la forza elettromagnetica, ma si conosceva molto poca busta le forze nucleari. Inoltre, Einstein si rifiutava di credere nella realtà della meccanica quantica, nonostante l'importante ruolo che egli aveva svolto nel suo sviluppo. Tuttavia, sembra essere che il principio di incertezza è una caratteristica fondamentale dell'universo in cui viviamo. Una teoria unificatrice che abbia successo ha, pertanto, che incorporare necessariamente questo principio.

Come descriverò, le prospettive di trovare una teoria come questa sembrano essere migliora ora, poiché conosciamo molto più busta l'universo. Ma dobbiamo conservarci di un eccesso di fiducia: abbiamo avuto già false aurore! Agli inizi di questo secolo, per esempio, si pensava che tutto poteva essere spiegato in termini delle proprietà della materia continua, tali come l'elasticità e la conduzione calorífíca. La scoperta della struttura atomica ed il principio di incertezza misero una fine tagliente a tutto ciò. Di nuovo, in 1928, il fisico e premio Nóbel Max Born disse ad un gruppo di visitatori dell'Università di Gotinga, "la fisica, dato come quella conosciamo, sarà finita in sei mesi." La sua fiducia si basava sulla recente scoperta per Dirac dell'equazione che governava all'elettrone. Si pensava che un'equazione simile governerebbe al protone che era l'altra unica particella conosciuta in quello momento, e quello sarebbe il fine della fisica teorica. Tuttavia, la scoperta del neutrone e delle forze nucleari lo smentì chiaramente. Detto questo, ancora credo che ci siano ragioni per un ottimismo prudente sul fatto che possiamo stare ora vicino al fine della ricerca delle leggi ultime della natura.
Nei capitoli anteriori ho descritto la relatività generale, la teoria parziale della gravità, e le teorie parziali che governano alle forze debole, forte ed elettromagnetica. Le tre ultime possono accordarsi nelle chiamate teorie di gran unificazione, o TGU che non

sono molto soddisfacenti perché non includono alla gravità e perché contengono varie quantità, come le masse relative di differenti particelle che non possono essere dedotte della teoria ma devono essere scelte in modo che si adattino alle osservazioni. La principale difficoltà per trovare una teoria che unifichi la gravità con le altre forze poggia in che la relatività generale è una teoria "classica", questo vuole dire che non incorpora il principio di incertezza della meccanica quantica. D'altra parte, le altre teorie parziali dipendono dalla meccanica quantica di forma essenziale. Un primo passo necessario, quindi, consiste in combinare la relatività generale col principio di incertezza. Come abbiamo visto, ciò può avere alcuni conseguenze molto notevoli, come che i buchi neri non siano neri, e che l'universo non abbia nessuna singolarità ma sia completamente atto contenuto e senza una frontiera. Il problema è, come si spiegò nel capitolo 7 che il principio di incertezza implica che lo spazio "vuoto" è pieno di pari di particelle ed antipartículas virtuali. Queste paia avrebbero una quantità infinita di energia e, quindi, attraverso la famosa equazione di Einstein E=mc2, avrebbero una quantità infinita di massa. La sua attrazione gravitazionale curverebbe, pertanto, l'universo fino ad un volume infinitamente piccolo.

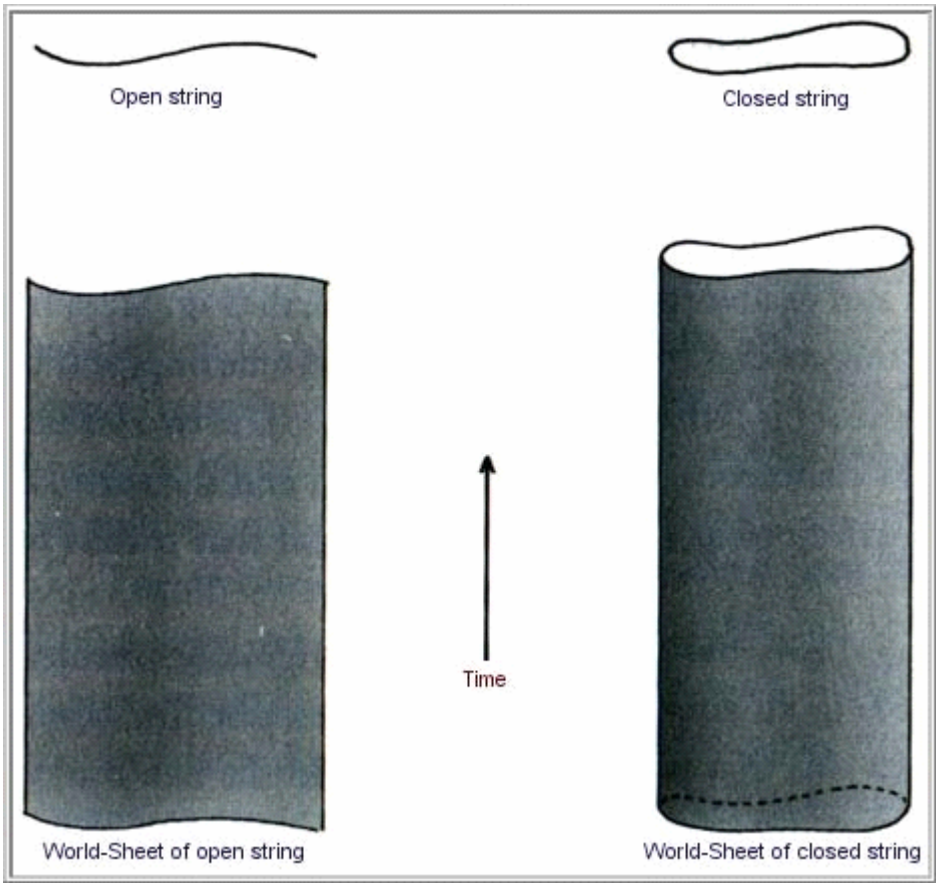
Di forma abbastanza simile, si trovano infiniti apparentemente assurdi nelle altre teorie parziali, ma in tutti questi casi gli infiniti possono essere soppressi mediante un processo di renormalización che suppone cancellare gli infiniti introducendo altri infiniti. Benché questa tecnica sia abbastanza dubbiosa matematicamente, sembra funzionare nella pratica, e è stato utilizzata in queste teorie per ottenere predizioni, con una precisione straordinaria, che concordano con le osservazioni. La renormalización, tuttavia, presenta un serio inconveniente nel momento di trovare una teoria completa, poiché implica che i valori reali delle masse e le intensità delle forze non possono essere dedotte della teoria, ma devono essere scelti per adattarli alle osservazioni.

Cercando di incorporare il principio di incertezza alla relatività generale si disporsi solo di due quantità che possono stringersi: l'intensità della gravità ed il valore della costante cosmologica. Ma l'accomodamento di queste quantità non è sufficiente per eliminare tutti gli infiniti. Si tiene, pertanto, una teoria che sembra predire che determinate quantità, come la curvatura dello spazio-tempo, sono realmente infinite, nonostante il quale possono osservarsi e misurarsi come perfettamente finite!  Per qualche tempo si sospettò l'esistenza del problema di combinare la relatività generale ed il principio di incertezza, ma, in 1972, fu finalmente confermato mediante calcoli dettagliati. Quattro anni dopo si suggerì una possibile soluzione, chiamata "súper gravità."  L'idea consisteva in combinare la particella di porcospino 2, chiamato gravitón, che trasporta la forza gravitazionale, con certe particelle nuove di porcospino 3/2, 1, 1/2 e 0. In un certo senso, tutte questi particelle potrebbero essere considerate come differenti aspetti della stesso "superpartícula", unificando in questo modo le particelle materiali di porcospino 1/2 e 3/2 con le particelle portatrici di forza di porcospino 0, 1 e 2. La paia particella / antipartícula virtuali di porcospino 1/2 e 3/2

avrebbero energia negativa, e di quello modo tenderebbero a cancellare l'energia positiva delle paia virtuali di porcospino 2, 1 e 0. Questo potrebbe fare che molti dei possibili infiniti fossero eliminati, ma si sospettava che potrebbero rimanere ancora alcuni infiniti. Tuttavia, i calcoli necessari per verificare se rimanevano o non alcuni infiniti senza cancellare erano tanto lunghi e difficili che nessuno stava preparato per assalirli. Si stimò che, perfino con un computer, sarebbero per lo meno da quattro anni, e c'erano molte possibilità che si commettesse almeno un errore, e probabilmente più. Pertanto, mi saprei che si terrebbe la risposta corretta solo se qualcuno più ripetevo il calcolo ed ottenevo lo stesso risultato, e quello non sembravo molto probabile!

Nonostante questi problemi, e che le particelle delle teorie di súper gravità non sembravano concordare con le particelle osservate, la maggioranza degli scienziati credeva che la súper gravità costituiva probabilmente la risposta corretta al problema dell'unificazione della fisica.  Sembrava la migliore strada per unificare la gravità con le altre forze. Tuttavia, in 1984 si produrse un notevole cambiamento di opinione in favore di quello che si conosce come teorie di archi. In queste teorie, gli oggetti basilari non sono particelle che occupano un unico punto dello spazio, altro che oggetti che possiedono una longitudine ma nessuna altra dimensione più, simili a pezzi infinitamente magri di corda. Questi archi possono avere estremi, le chiamate sagge aperte, o possono stare unite con sé stesse in lacci chiusi (archi chiusi  (figura 10.1 e figura 10.2. Una particella occupa un punto dello spazio in ogni istante di tempo. Così, la sua storia può rappresentarsi mediante una linea nello spazio-tempo, la "linea" del mondo.  Una corda, al contrario, occupa una linea nello spazio, in ogni istante di tempo. Pertanto, la sua storia nello spazio-tempo è una superficie bidimensionale chiamata la "foglia" del mondo. , Qualunque punto in una foglia del mondo può essere descritto mediante due numeri: uno specificando il tempo e l'altro la posizione del punto sulla corda.  La foglia del mondo di una corda aperta è un nastro; i suoi bordi rappresentano le strade attraverso lo spazio-tempo degli estremi della corda, figura 10.1. La foglia del mondo di una corda chiusa è un cilindro o tubo, figura 10.2,; una fetta trasversale del tubo è un circolo che rappresenta la posizione della corda in un istante particolare. Due frammenti di corda possono unire si ferma formare un'unica corda; nel caso di archi aperti si uniscono semplicemente per gli estremi, figura 10.3, mentre nel caso di archi chiusi l'unione è simile alle due gambe di un paio di pantaloni unendosi, figura 10.4. Di forma analoga, un unico frammento di corda può dividersi in due archi. Nelle teorie di archi, quello che si consideravano anteriormente particelle, si descrivono ora come onde viaggiando per la corda, come le ondulazioni della corda vibrante di un'aquilone. L'emissione o assorbimento di una particella per un'altra corrisponde alla divisione
o riunione di archi. Per esempio, la forza gravitazionale del Sole sulla Terra si descrive nelle teorie di particelle come causata per l'emissione di un gravitón per una particella nel Sole ed il suo assorbimento per una particella nella Terra, figura 10.5.

Nella teoria di archi, quello processo corrisponde ad un tubo o tubatura in forma di H, figura 10.6, (la teoria di archi, in un certo modo, somiglia abbastanza all'idraulica.  I due lati verticali della H corrispondono alle particelle nel Sole e nella Terra, e la traversa trasversale corrisponde al gravitón che viaggia tra esse.




Raffiguri 11:1 & 11:2

La teoria di archi ha una storia curiosa.  Si inventò alla fine degli anni 60 in un tentativo di trovare una teoria per descrivere l'interazione forte. L'idea consisteva in che particelle come il protone ed il neutrone potevano essere considerati come onde in una corda. L'interazione forte tra le particelle corrisponderebbe a frammenti di corda che si estenderebbero tra altri pezzi di corda, come in un tessuto di ragno. Affinché questa teoria proporzionasse il valore osservato per l'interazione forte tra particelle, gli archi dovevano essere come strisce di gomma con una tensione di circa dieci tonnellate.

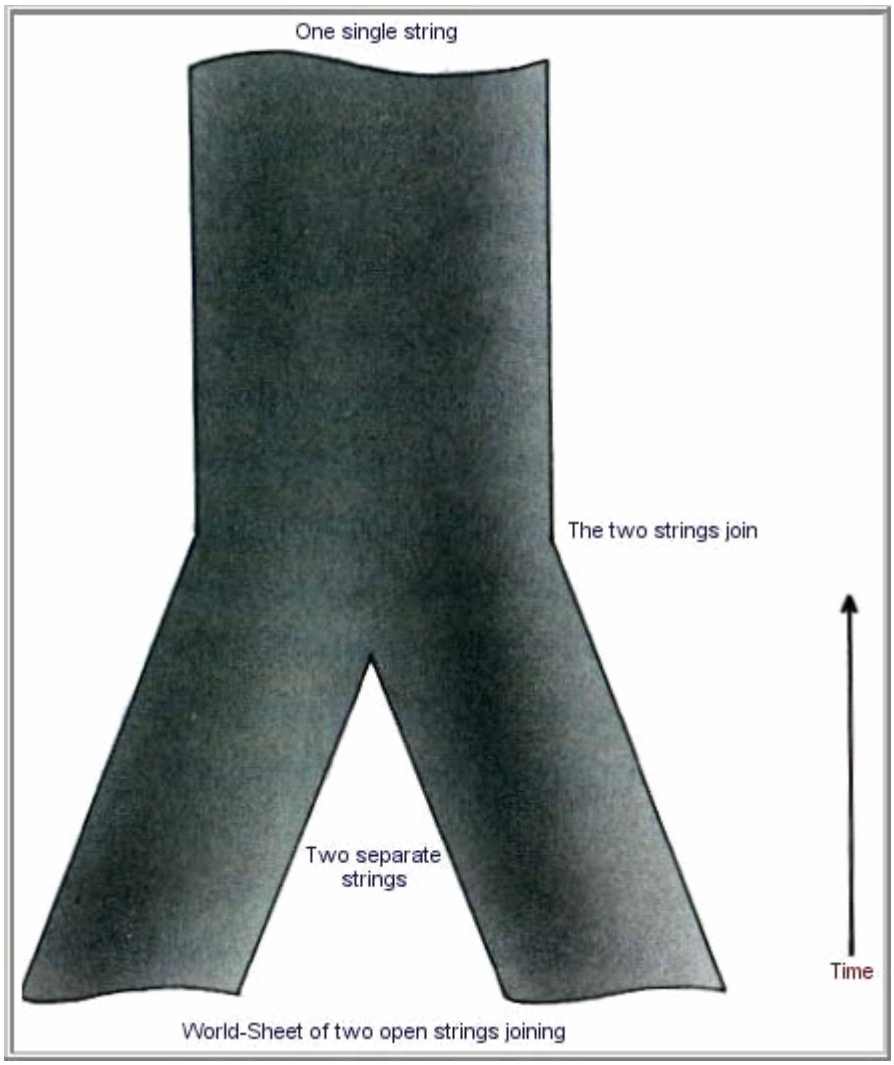

One single string
The two strings join
Two separate strings
Time
World-Sheet of two open strings joining

Figura 11:3

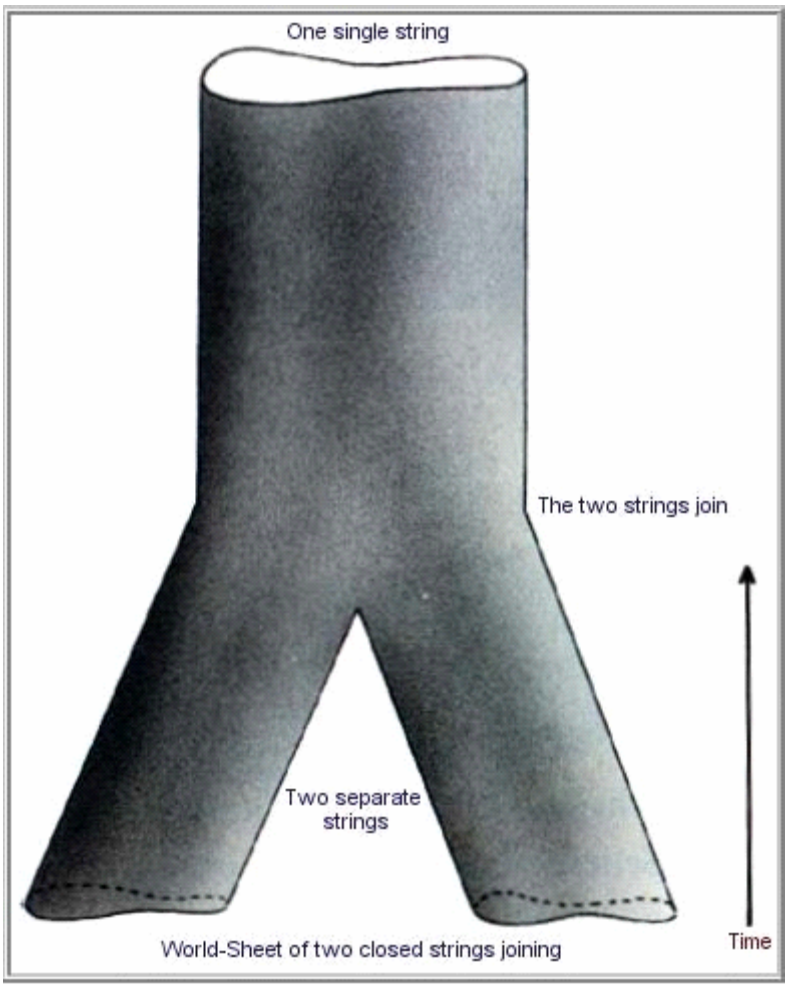
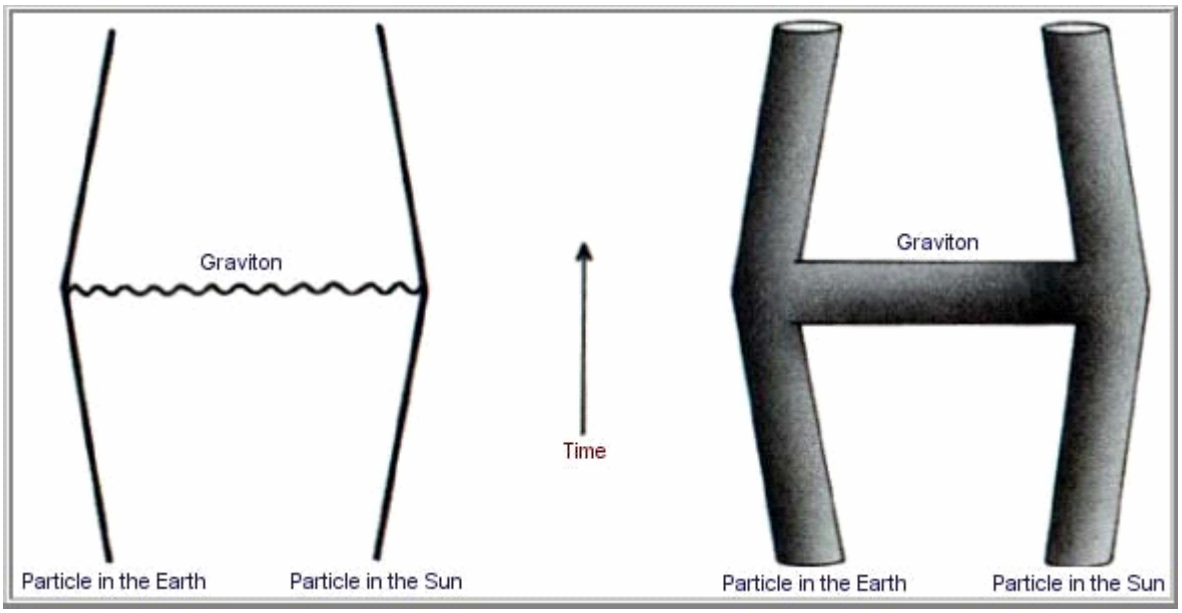



Figura 11:4

In 1974, Joél Scherk, di Parigi, e John Schwarz, dell'Istituto di Tecnologia della California, pubblicarono un articolo sul quale mostravano che la teoria di archi poteva descrivere la forza gravitazionale, ma solo se la tensione nella corda fosse molto più elevata, attorno a mille miliardi di miliardi di miliardi di tonnellate, un 1 con trenta nove zeri dietro.  Le predizioni della teoria di archi sarebbero le stesse che quelle della relatività generale a scale di longitudine normali, ma differirebbero a distanze molto piccole, minori di una millesimo di una milionesimo di miliardesimo di miliardesimo di centimetro, un centimetro diviso per un 1 con trenta tre zeri dietro. Il suo lavoro non ricevè molta attenzione, tuttavia, poiché giostro in quello momento la maggioranza delle persone abbandonavano la teoria di archi originali per l'interazione forte, in favore della teoria basata nei *quarks* ed i gluones che sembrava adattarsi molto meglio alle osservazioni. Scherk morì in circostanze tragiche, soffriva diabete e soffrì un coma in un momento in che non aveva nessuno vicino a lui per fargli un'iniezione di insulina. Così, Schwarz rimase assolo come difensore quasi unico della teoria di archi, ma ora con un valore proposto per la tensione della corda molto più elevato.




Raffiguri 11:5 & 11:6

In 1984, l'interesse per gli archi resuscitò improvvisamente, apparentemente per due ragioni. Un'era che la gente non stava facendo, in realtà, molti progressi, durante il tragitto di mostrare che la súper gravità era finita o che poteva spiegare i tipi di particelle che osserviamo. L'altra fu la pubblicazione di un articolo di John Schwarz e Mike Green, del Queen Mary College, di Londra, che mostrava che la teoria di archi poteva essere capace di spiegare l'esistenza di particelle che hanno incorporato un carattere levógiro, come alcune delle particelle che osserviamo. Chiunque che fosse le ragioni, pronto un gran numero di persone cominciò a lavorare nella teoria di archi, e si sviluppò una nuova versione, le chiamate saggio "heteróticas" che sembrava che potesse essere capace di spiegare i tipi di particelle che osserviamo. Anche le teorie di archi conducono ad infiniti, ma si pensa che tutti essi spariranno in versioni come quella delle saggi heteróticas, benché questo non si sappia ancora con certezza. Le teorie di archi, tuttavia, presentano un problema maggiore: sembrano essere consistenti solo se lo spazio-tempo ha o dieci o ventisei dimensioni, invece delle quattro usuali! Ovviamente, le dimensioni extra dello spazio-tempo costituiscono un posto comune per la fantascienza; veramente, sono quasi una necessità per questa, poiché altrimenti il fatto che la relatività implichi che non può viaggiarsi più rapido della luce significa che tarderebbe troppo tempo a viaggiare tra stelle e galassie. L'idea della fantascienza è che forse può prendersi una scorciatoia attraverso una dimensione superiore. È possibile immaginarsilo della seguente maniera. Supponiamo che lo spazio nel quale viviamo ha solo due dimensioni e sta curvato come la superficie di un anello di ancora o toro, figura 10.7. Se si stesse in un posto del lato interno dell'anello e Lei volesse andare ad un punto situato di fronte, dovrebbe andare attorno al lato interno dell'anello. Tuttavia, se uno fosse capace di viaggiare nella terza dimensione, potrebbe tagliare on-line retta.

Perché non notiamo tutti quelli dimensioni extra, se stanno realmente lì? Perché vediamo solamente tre dimensioni spaziali ed un temporale? Il suggerimento è che le altre dimensioni sono ricurve in un spazio Molto piccolo, qualcosa come una miliardesimo di una miliardesimo di una miliardesimo di un centimetro Quello è tanto piccolo che semplicemente non lo notiamo; vediamo solamente una dimensione temporanea e tre spaziali, nelle quali lo spazio-tempo è abbastanza piano.  È come la superficie di un'arancia: se se la guarda da molto vicino sta tutta ricurva e rugosa, ma se se la guarda a distanza non si vedono le protuberanze e sembra che sia liscia. La stessa cosa succede con lo spazio-tempo: ad una scala molto piccola ha dieci dimensioni e è molto ricurvo, ma a scale maggiori non si vedono né la curvatura né i dimensioni extra. Se questa immagine fosse corretta, presagirebbe brutte notizie per gli aspiranti a viaggiatori: i dimensioni extra sarebbero con molto troppo piccole per ammettere un'imbarcazione spaziale intera. Espone, tuttavia, un altro problema importante. Perché devono essere raggomitolate in un piccolo aggomitolo alcune delle dimensioni, ma non tutte? Presumibilmente, nell'universo primitivo tutte le dimensioni sarebbero state molto ricurve. Perché si appianarono solo una dimensione temporanea e tre spaziali, mentre le restanti dimensioni rimasero fortemente raggomitolate?

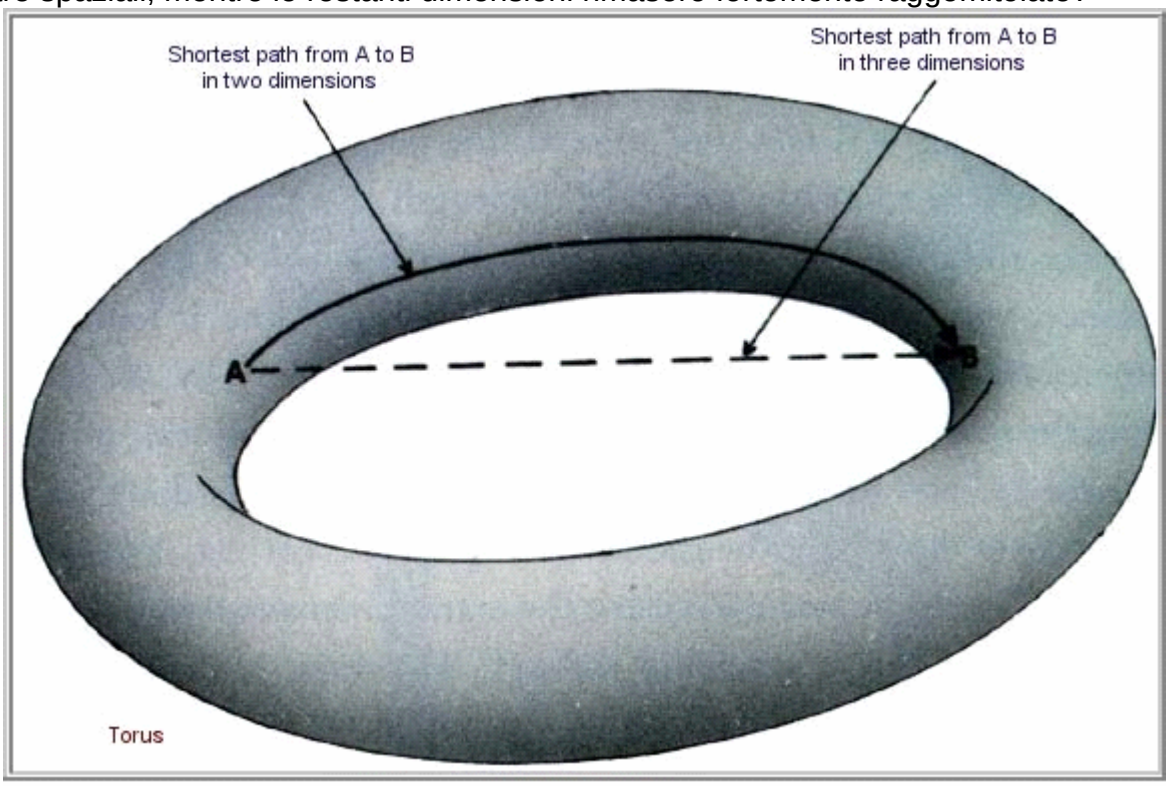



Figura 11:7

Una possibile risposta la troveremmo nel principio antrópico. Due dimensioni spaziali non sembrano essere sufficienti per permettere lo sviluppo di esseri complicati come noi. Per esempio, animali bidimensionali su una terra unidimensionale dovrebbero

arrampicare alcuni su altri per affrettarsi. Se una creatura bidimensionale mangiasse qualcosa non potrebbe digerirlo completamente, dovrebbe vomitare i residui per la stessa strada per la quale se li divorò, poiché se ci fosse un passo attraverso il suo corpo dividerebbe la creatura in due metà separate; il nostro essere bidimensionale si romperebbe, figura 10.8. Analogamente, è difficile da capire come potrebbe avere circolazione del sangue in una creatura bidimensionale.

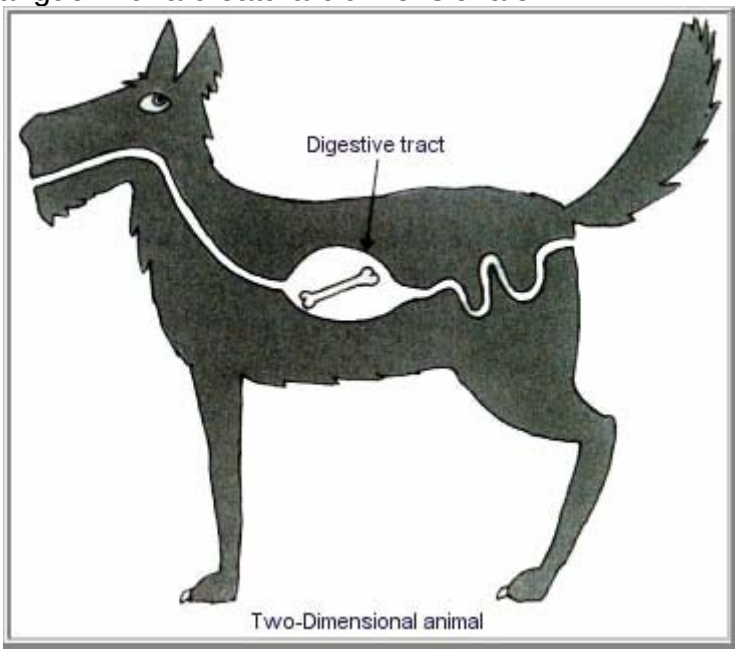



Figura 11:8

Ci sarebbero anche problemi con più di tre dimensioni spaziali.  La forza gravitazionale in due corpi diminuirebbe con la distanza più rapidamente di quello che lo fa in tre dimensioni. , In tre dimensioni, la forza gravitazionale cade a 1/4 se si raddoppia la distanza.  In quattro dimensioni cadrebbe a 1/8, in cinque dimensioni a 1/16, e così via. Il significato di tutto questo è che le orbite dei pianeti attorno al Sole, come per esempio quella della Terra, sarebbero instabili: la minore perturbazione, come prodotta la per l'attrazione gravitazionale degli altri pianeti, su un'orbita circolare darebbe come risultato quello che la Terra girasse in spirale, oppure verso il Sole oppure allontanandosi da lui. o ci congeleremmo o ci scotteremmo. In realtà, lo stesso comportamento della gravità con la distanza in più di tre dimensioni spaziali significherebbe che il Sole non potrebbe esistere in un stato stabile, nel quale la pressione compensasse alla gravità. o si romperebbe o collasserebbe per formare un buco nero.  In qualsiasi caso non sarebbe di molta utilità come fonte di caldo e di luce per la vita sulla Terra. Ad una scala più piccola, le forze elettriche che fanno che gli elettroni girino attorno al nucleo in un atomo si comporterebbero dello stesso modo che le forze gravitazionali. Così, gli elettroni o scapperebbero totalmente dall'atomo o cadrebbero in spirale nel nucleo. In chiunque dei due casi non potrebbe avere atomi come noi li conosciamo.

Sembra evidente che la vita, almeno come noi la conosciamo, può esistere solamente in regioni dello spazio-tempo nei che una dimensione temporanea e tre dimensioni spaziali non sono molto raggomitolate. Questo significa che potrebbe ricorrersi all'inizio antrópico debole, nell'ipotesi che Lei potesse dimostrare che la teoria di archi permette almeno che esistano tali regioni nell'universo, e sembra che veramente lo permetta. Potrebbe avere perfettamente altre regioni dell'universo, o altri universi, sia quello che sia quello che *quello possa* significare, nelle quali tutte le dimensioni fossero molto raggomitolate o nelle quali fossero approssimativamente piane più di quattro dimensioni, ma non ci sarebbero esseri intelligenti in quelle regioni per osservare il numero differente di dimensioni effettive.

A parte la questione del numero di dimensioni che lo spazio-tempo sembra avere, la teoria di archi espone ancora altri problemi che devono essere risoluti prima che possa essere riconosciuta come la teoria unificatrice definitiva della fisica. Non sappiamo ancora se tutti gli infiniti si cancelleranno alcuni ad altri, o come riferire esattamente le onde sulla corda coi tipi specifici di particelle che osserviamo. Nonostante, è probabile che nei prossimi anni si trovino risposte a queste domande, e che verso il fine di secolo sappiamo se la teoria di archi costituisce veramente la teoria unificatrice molto bramata della fisica.

Ma, può avere in realtà una tale teoria unificatrice? O stiamo forse perseguendo unicamente un miraggio?  Sembra c'essere tre possibilità:

1
1 Esiste realmente una teoria unificatrice completa che scopriremo qualche giorno se siamo il sufficientemente intelligenti.
2 2 Non esiste nessuna teoria definitiva dell'universo, bensì una successione infinita di teorie che descrivono l'universo ciascuna volta con più precisione.
3 3 Non c'è nessuna teoria dell'universo; gli avvenimenti non possono predirsi oltre un certo punto, poiché succedono in una maniera aleatoria ed arbitraria.

Alcuni sosterrebbero la terza possibilità sulla base che, se ci fosse un insieme completo di leggi, ciò andrebbe contro la libertà di Dio di cambiare opinione ed intervenire nel mondo. È sembrato qualcosa al vecchio paradosso: può Dio fare una pietra tanto pesante che egli non possa alzarla?  Tuttavia, l'idea che Dio potesse volere cambiare opinione è un esempio della fallacia, segnalata per san Agustín, di immaginare a Dio come un essere che esiste nel tempo: il tempo è una proprietà solo dell'universo che Dio creó. All'opinione sapevo quello che volevo quando lo costruì!

Con la venuta della meccanica quantica siamo arrivati a riconoscere che gli avvenimenti non possono predirsi con completa precisione, ma c'è sempre un grado di

incertezza. Se si ama, può attribuirsi quell'aleatorietà all'intervento di Dio, ma si tratterebbe di un intervento molto strano; non c'è nessuna evidenza che sia diretta verso nessun proposito. Se avesse alcuno non sarebbe, per definizione, aleatoria. Nei tempi moderni abbiamo eliminato in realtà la terza possibilità, ridefinendo l'oggetto della scienza: la nostra intenzione è formulare un insieme di leggi che ci permettano solo di predire avvenimenti fino al limite imposto per il principio di incertezza.

La seconda possibilità, il che esista sempre di più una successione infinita di teorie raffinate, è di accordo con tutta la nostra esperienza fino al momento. In molte occasioni abbiamo aumentato la sensibilità delle nostre misure o abbiamo realizzato un nuovo tipo di osservazioni, scoprendo nuovi fenomeni che non erano predichos per la teoria esistente, e per spiegarli abbiamo dovuto sviluppare una teoria più avanzata. Non sarebbe, pertanto, molto sorprendente se la generazione attuale di teorie di gran unificazione si sbagliasse, pretendendo che niente essenzialmente nuovo succederà tra l'energia di unificazione electrodébil, di circa 100 GeV, e l'energia di gran unificazione, di attorno a mille miliardi di GeV. Marciremmo, in realtà, sperare di trovare vari livelli di struttura più basilari che i *quarks* ed elettroni che ora consideriamo come particelle "elementari."

Tuttavia, sembra che la gravità possa mettere un limite a questa successione di "scatole dentro scatole." Se ci fosse una particella con un'energia al di sopra di quello che si conosce come energia di Planck, dieci milioni di miliardi di GeV, un 1 seguito di diciannove zeri, la sua massa sarebbe tanto concentrata che si amputerebbe lei stessa del resto dell'universo e formerebbe un piccolo buco nero. In questo modo, sembra che la successione di teorie sempre di più raffinate deve avere qualche limite man mano che andiamo sempre di più verso energie alte, pertanto, deve esistere alcuno teoria definitiva dell'universo. Ovviamente, l'energia di Planck stai molto lontano dalle energie di circa 100 GeV che sono la cosa massima che può produrrsi nel laboratorio nel momento attuale e non salveremo il vuoto con acceleratori di particelle in un futuro prevedibile! Le tappe iniziali dell'universo, tuttavia, furono un rodo in quello che tali energie dovettero essersi dato.  Penso che c'è una gran probabilità che lo studio dell'universo primitivo e le esigenze di consistenza matematica ci conducano ad una teoria unificatrice completa tra il periodo della vita di alcuno dei che stiamo oggi qui, sempre supponendo che prima non c'annichiliamo stessi.

Che cosa supporrebbe scoprire realmente la teoria ultima dell'universo? Come si spiegò nel capitolo 1, non potremmo essere mai sufficientemente sicuri di avere trovato veramente la teoria corretta, poiché le teorie non possono essere dimostrate. Ma se la teoria fosse matematicamente consistente e hicíese predizioni che concordasse sempre con le osservazioni, potremmo stare ragionevolmente sicuri che si tratterebbe della corretta.  Arriverebbe alla sua fine un lungo e glorioso capitolo nella storia della lotta intellettuale dell'umanità per comprendere l'universo. Ma anche ciò

rivoluzionerebbe la comprensione delle leggi che lo governano da parte delle persone correnti.  Nell'epoca di Newton, era possibile, per una persona istruita, abbracciare tutta la conoscenza umana, almeno in termini generali. Ma, da allora, il ritmo di sviluppo della scienza l'ha fatto impossibile.  Poiché le teorie stanno essendo modificate continuamente per spiegare nuove osservazioni, non sono mai digerite debitamente o semplificate in modo che la gente comune possa capirli. È necessario essere un specialista, ed allora può aversi perfino solo la speranza di dominare correttamente una piccola parte delle teorie scientifiche. Inoltre, il ritmo di progresso è tanto rapido che quello che impara nella scuola o nell'università sta sempre qualcosa sfasato. Solo poche persone possono andare al passo del rapida avanzamento della frontiera della conoscenza, e devono dedicare tutto il suo tempo a ciò e specializzarsi ed un'area ridotta. Il resto della popolazione ha poca idea degli anticipi che si stanno facendo o dell'attesa che stanno generando. Settanta anni fa, se dovevamo credere ad Eddington, solo due persone capivano la teoria generale della relatività. Oggigiorno decine di migliaia di graduati universitari la capiscono ed a molti milioni di persone è loro almeno familiare l'idea.  Se Lei scoprisse una teoria unificatrice completa, sarebbe solo una questione di tempo quello che fosse digerita e semplificata dello stesso modo ed insegnata nelle scuole, almeno in termini generali. Tutti saremmo capaci, allora, di possedere alcuno comprensione delle leggi che governano l'universo e sono responsabili della nostra esistenza. Perfino se scoprisse una teoria unificatrice completa, ciò non significherebbe che fosse capaci di predire avvenimenti in generali, per due ragioni.  La prima è la limitazione che il principio di incertezza della meccanica quantica stabilisce sulla nostra capacità di predizione. Non c'è niente che possiamo fare per girare questo. In il-pratica, tuttavia, questa prima limitazione è meno restrittiva della seconda. Questa sorge dal fatto che non potremmo risolvere esattamente le equazioni della teoria, eccetto in situazioni molto semplici. , Perfino non possiamo risolvere esattamente il movimento di tre corpi nella teoria della gravità di Newton, e la difficoltà aumenta col numero di corpi e la complessità della teoria.  Conosciamo già le leggi che governano il comportamento della materia in tutte le condizioni eccetto nelle più estreme. In questione, conosciamo le leggi basilari che sottostanno sotto tutta la chimica e la biologia.  Certamente, non abbiamo ridotto ancora queste discipline allo stato di problemi risoluti; abbiamo avuto, fino ad ora, poco successo predicendo il comportamento umano a partire da equazioni matematiche!  Pertanto, perfino se troviamo un insieme completo di leggi basilari, rimarrà ancora intellettualmente per gli anni venturi il compito sfidante di sviluppare migliori metodi di avvicinamento, in modo che possiamo fare predizioni utili sui risultati probabili in situazioni complicate e realisti. Una teoria unificatrice completa, consistente, è solo il primo passo: la nostra meta è una completa *comprensione* di quello che succede intorno a nostro e della nostra propria esistenza.

## Capitolo 12

## CONCLUSIONE

Ci troviamo in un mondo sconcertante. Vogliamo dare senso a quello che vediamo intorno a nostro, e ci domandiamo: quale è la natura dell'universo? Quale è il nostro posto in lui, e da dove sorgiamo egli e noi? Perché è come è?

Per tentare di rispondere a queste domande adottiamo una certa "immagine" del mondo. Dello stesso modo che una torre infinita di tartarughe sostenendo ad una Terra piana è un'immagine mentale, lo è la teoria delle supercuerdas. Entrambe sono teorie dell'universo, benché l'ultima sia molto più matematica e precisa che la prima. Ad entrambe le teorie manca loro accertamento sperimentale: nessuno ha visto mai una tartaruga gigante con la Terra sulla sua schiena, ma neanche ha visto nessuno una supercuerda. Tuttavia, la teoria della tartaruga non è una teoria scientifica perché suppone che la gente dovrebbe potere cadere per il bordo dal mondo. Non si è osservato che questo coincida con l'esperienza, a meno che risulti essere la spiegazione di perché sei sparito, suppostamente, tanta gente nel Triangolo delle Bermude!

I primi tentativi teorici di descrivere e spiegare l'universo includevano l'idea che gli eventi ed i fenomeni naturali erano controllati per spiriti con emozioni umane che agivano di una maniera molto umana ed impredecible. Questi spiriti abitavano in posti naturali, come fiumi e montagne, compresi i corpi celesti, come il Sole e la Luna. Dovevano essere placati e bisognava sollecitare i suoi favori per assicurare la fertilità del suolo e la successione delle stazioni. Gradualmente, tuttavia, dovette osservarsi che aveva alcuni regolarità: il Sole usciva sempre per l'est e si metteva per l'ovest si avesse o non si sarebbe fatto un sacrificio al dio del Sole. Inoltre, il Sole, la Luna ed i pianeti seguivano strade precise attraverso il cielo che potevano predirsi in anticipo e con precisione considerabili. Il Sole e la Luna potevano essere ancora dei, ma erano apparentemente dei che obbedivano a leggi strette, senza nessuna eccezione, se si lasciano ad un lato storie come quella di Josué fermando il Sole.

Al principio, queste regolarità e leggi erano evidenti solo in astronomia ed in poche situazioni più. Tuttavia, man mano che la civiltà evolveva, e particolarmente negli ultimi 300 anni, furono scoperte sempre di più regolarità e leggi. Il successo di queste leggi portò a Laplace, agli inizi del secolo xix, a postulare il determinismo scientifico, cioè, suggerì che c'era un insieme di leggi che determinerebbero l'evoluzione dell'universo con precisione, data la sua configurazione in un istante.

Il determinismo di Laplace era incompleto in due sensi. Non diceva come devono scegliersi le leggi e non specificava la configurazione iniziale dell'universo. Questo lo lasciava a Dio. Dio sceglierebbe come cominciò l'universo e che leggi ubbidirebbe, ma

non interverrebbe nell'universo una volta che questo avrebbe messo in moto. In realtà, Dio fu confinato alle aree che la scienza del secolo xix non capiva.

Sappiamo ora che le speranze di Laplace sul determinismo non possono farsi realtà, almeno nei termini che egli pensava. Il principio di incertezza della meccanica quantica implica che certi compagni di quantità, come la posizione e la velocità di una particella, non possono predirsi con completa precisione.

La meccanica quantica si occupa di questa situazione mediante un tipo di teorie quantiche nel quale le particelle non hanno posizioni né velocità ben definite, ma sono rappresentate per un'onda.  Queste teorie quantiche sono deterministi nel senso che proporzionano leggi sull'evoluzione dell'onda nel tempo. Così, se si conosce l'onda in un istante, può calcolarsi in qualunque altro istante. L'elemento aleatorio, impredecible, entra in gioco solo quando tentiamo di interpretare l'onda in termini delle posizioni e velocità di particelle. Ma magari quello è il nostro errore: forse non esistano posizioni e velocità di particelle, bensì solo onde. Si tratta semplicemente che cerchiamo di adattare le onde alle nostre idee preconcette di posizioni e velocità. Il cattivo accoppiamento che risulta è la causa dell'apparente impredictibilidad.

In realtà, abbiamo ridefinito il compito della scienza come la scoperta di leggi che ci permettano di predire avvenimenti fino ai limiti imposti per il principio di incertezza. Rimane, tuttavia, la seguente questione: come o perché furono scelte le leggi e lo stato iniziale dell'universo?

In questo libro ho dato speciale rilievo alle leggi che governano la gravità, poiché è la gravità quella che determina la struttura dell'universo a gran scala, malgrado sia il più debole delle quattro categorie di forze. Le leggi della gravità erano incompatibili con la prospettiva mantenuta fino a recentemente che l'universo non cambia col tempo: il fatto che la gravità sia sempre attraente implica che l'universo deve stare espandendosi o contrarsisi. Di accordo con la teoria generale della relatività, dovette c'essere stato un stato di densità infinita nel passato, il *big bang,* che avrebbe costituito un vero principio del tempo. Di forma analoga, se l'universo intero Lei collassasse di nuovo dovrebbe c'essere un altro stato di densità infinita nel futuro, il *big crunch,* che costituirebbe un fine del tempo. Perfino se Lei non collassasse di nuovo, ci sarebbero singolarità in alcuni regioni localizzate che collasserebbero per formare buchi neri. Queste singolarità costituirebbero un fine del tempo per chiunque che cadesse nel buco nero. Nel *big bang* e nelle altre singolarità tutte le leggi avrebbero ceduto, in modo che Dio avrebbe avuto ancora completa libertà per decidere quello che succedè e come cominciò l'universo.

Quando combiniamo la meccanica quantica con la relatività generale sembra c'essere una nuova possibilità che non sorse prima: insieme lo spazio ed il tempo potrebbero

formare un spazio di quattro dimensioni finito, senza singolarità né antistanti, come la superficie della Terra ma con più dimensioni.  Sembra che questa idea potesse spiegare molte delle caratteristiche osservate dell'universo, tali come la sua uniformità a gran scala ed anche le deviazioni dell'omogeneità a più piccola scala, come le galassie, stelle e perfino gli esseri umani.  Potrebbe spiegare perfino la freccia del tempo che osserviamo. Ma se l'universo è totalmente atto contenuto, senza singolarità né antistanti, e è descritto completamente per una teoria unificatrice, tutto ciò ha profonde applicazioni sulla carta di Dio come Creatore.

Einstein una volta si fece la domanda: "quante possibilità di elezione aveva Dio costruendo l'universo?." Se la proposta del no esistenza di frontiera è corretta, non ebbe in assoluto nessuna libertà per scegliere le condizioni iniziali.  Avrebbe avuto ancora, ovviamente, la libertà di scegliere le leggi a che l'universo obbedirebbe. Questo, tuttavia, non era potuto essere realmente una vera elezione; può molto bene esistere solo una, o un piccolo numero di teorie unificatrici complete, tali come la teoria delle saggi heteróticas che siano autoconsistentes e che permettano l'esistenza di strutture tanto complicate come esseri umani che possano investigare le leggi dell'universo ed interrogarsi circa la natura di Dio.

Perfino se c'è solo una teoria unificatrice possibile, si tratta unicamente di un insieme di regole e di equazioni. Che cosa è quello che insuffla fuoco nelle equazioni e creda un universo che può essere descritto da esse?  Il metodo usuale della scienza di costruire un modello matematico non può rispondere alle domande di perché deve avere un universo che sia descritto dal modello. Perché attraversa l'universo per tutte le difficoltà dell'esistenza? È la teoria unificatrice tanto convincente che causa la sua propria esistenza? 0 necessita un creatore e, se è così, ha questo qualche altro effetto sull'universo? E chi il creó a lui?
Fino ad ora, la maggioranza degli scienziati sono stati troppo occupati con lo sviluppo di nuove teorie che descrivono *come* l'universo è per farsi la domanda di perché. D'altra parte, la gente il cui occupazione è domandarsi perché*,* i filosofi, non hanno potuto avanzare al passo delle teorie scientifiche. Nel secolo XVlll**.,** i filosofi consideravano tutta la conoscenza umano, compresa la scienza, come il suo campo, e discutevano questioni come, ebbe l'universo un principio? Tuttavia, nei secoli xix e xx, la scienza diventò troppo tecnica e matematica per essi, e ferma chiunque, eccetto per pochi specialisti. I filosofi ridussero tanto l'ambito delle sue indagini che Wittgenstein, il filosofo più famoso di questo secolo, disse: "l'unico compito che rimane alla filosofia è l'analisi del linguaggio." Che distanzia dalla gran tradizione filosofica di Aristotele a Kant!

Nonostante, se scopriamo una teoria completa, col tempo sarà, nelle sue linee maestre, comprensibile per tutti ed unicamente non ferma pochi scienziati. Allora tutti, filosofi, scientifici e la gente corrente, saremo capaci di prendere parte alla discussione

di perché esiste l'universo e perché esistiamo noi. Se trovasse una risposta a questo, sarebbe il trionfo definitivo della ragione umana, perché allora conosceremmo il pensiero di Dio.

## ALBERT EINSTEIN

La connessione di Einstein con la politica della bomba nucleare è ben conosciuta: firmò la famosa lettera al presidente Franklin Roosevelt che spinse agli Stati Uniti a porsisi sul serio la questione, e prese parte agli sforzi del dopoguerra per ostacolare la guerra nucleare. Ma queste non furono le uniche azioni di un scienziato trascinato al mondo della politica. La vita di Einstein stette in realtà, utilizzando le sue proprie parole, "divisa tra la politica e le equazioni."

La prima attività politica di Einstein ebbe luogo durante la prima guerra mondiale, quando era professore a Berlino. Nauseato per quello che capiva come un sperpero di vite umane, si sommò alle manifestazioni antibellice.  La sua difesa della disubbidienza civile ed il suo alito pubblico affinché la gente respingesse il servizio militare obbligatorio non l'accumularono le simpatie dei suoi colleghi. Dopo, dopo la guerra, diresse i suoi sforzi verso la riconciliazione ed il miglioramento delle relazioni internazionali. Neanche questo gli fece popolare, e pronto i suoi atteggiamenti politici gli fecero difficile il potere visitare gli Stati Uniti, perfino per dare conferenze.

La seconda gran causa di Einstein fu il sionismo. Benché era di ascendenza ebrea, Einstein respinse l'idea biblica di Dio. Tuttavia, notando come cresceva l'antisemitismo, tanti alci come durante la prima guerra mondiale, si identificò gradualmente con la comunità ebrea, e, più tardi, si fece aperto sostenitore del sionismo. Un'altra volta l'impopolarità non gli impedì di parlare delle sue idee. Le sue teorie furono attaccate; si fondò perfino un'organizzazione anti-Einstein.  Un uomo fu condannato per incitare ad altri ad assassinare ad Einstein, e multato solo con sei dollari. Ma Einstein era flemmatico: quando si pubblicò un libro diplomato *100 autori contro Einstein, egli* replicò, "Se io mi sbagliassi, uno assolo sarebbe stato sufficiente!."

In 1933, Hitler arrivò al potere. Einstein stava in America, e dichiarò che non ritornerebbe in Germania. Dopo, mentre la milizia nazi invadeva la sua casa e confiscava il suo conto bancario, un giornale di Berlino spiegò in titolari, "Buone notizie di Einstein: "non ritorna." Davanti alla minaccia nazi, Einstein rinunciò al pacifismo, e, finalmente, temendo che gli scienziati tedeschi costruissero una bomba nucleare, propose che gli Stati Uniti fabbricassero la sua. Ma, perfino prima che esplodesse la prima bomba atomica notava pubblicamente sui pericoli della guerra nucleare e proponeva il controllo internazionale delle armi atomiche.

Durante tutta la sua vita, probabilmente gli sforzi di Einstein per la pace non riuscirono niente duraturo, e, certamente, gli fecero guadagnare pochi amici. Il suo eloquente appoggio alla causa sionista, tuttavia, fu debitamente riconoscente in 1952, quando gli fu offerta la presidenza dell'Israele. Egli ricusò, dicendo che credeva che era troppo ingenuo per la politica. Ma forse la sua vera ragione era differente: utilizzando di nuovo

le sue parole, "le equazioni sono più importanti per me, perché la politica è per il presente, ma un'equazione è qualcosa per l'eternità."

## GALILEO GALILEI

Forse più che nessuna altra persona, Galileo fu il responsabile della nascita della scienza moderna.  Il suo celebre conflitto con la Chiesa cattolica colpiva il nucleo del suo pensiero filosofico, poiché Galileo fu uno dei primi a sostenere che l'uomo poteva arrivare a comprendere come funziona il mondo, e, inoltre, che potrebbe farlo osservando il mondo reale.

Galileo aveva creduto nella teoria copernicana che i pianeti giravano attorno al Sole, da molto presto, ma solo quando trovò l'evidenza necessaria per sostenere l'idea, cominciò ad appoggiarla pubblicamente. Scrisse sulla teoria di Copernico in italiano, non nel latino accademico usuale, e rapidamente i suoi punti di vista furono attergati ampiamente fuori delle università. Questo disturbò i professori aristotelici che si unirono contro lui cercando di convincere alla Chiesa cattolica che proibisse il copernicanismo.

Galileo, preoccupato per ciò, viaggiò a Roma per parlare con le autorità ecclesiastiche. Arguì che il Bibbia non era pensato per dirci niente sulle teorie scientifiche, e che era normale supporre che quando il Bibbia entrava in conflitto col buonsenso stava essendo allegorico. Ma la Chiesa era paurosa di un scandalo che potesse debilitare la sua lotta contro il protestantesimo, e, pertanto, prese deterrenti. In 1616, dichiarò al copernicanismo "falso ed erroneo", ed ordinò a Galileo "non difendere o sostenere" mai più la dottrina. Galileo si sottomise. In 1623, un antico amico di Galileo fu fatto Papa. Immediatamente, Galileo trattò che il decreto di 1616 fosse revocato. Fallì, ma riuscì ad ottenere permesso per scrivere un libro discutendo le teorie aristotelica e copernicana, benché con due condizioni: che non si schiererebbe per nessuna di esse e che giungerebbe alla conclusione che l'uomo non potrebbe determinare in nessun caso come funziona il mondo, poiché Dio potrebbe produrre gli stessi effetti per strade inimaginados per l'uomo, il quale non poteva mettere restrizioni all'onnipotenza divina.

Il libro, *Dialogo sui due massimi sistemi del mondo,* fu finito ed edito in 1632, con lo schienale assoluto dei censori, e fu immediatamente ricevuto in tutta l'Europa come un'opera maestra, letteraria e filosofica. Pronto il Papa, rendendosi conto che la gente stava vedendo il libro come un convincente argomento in favore del copernicanismo, si pentì di avere permesso la sua pubblicazione. Il Papa argomentò che, benché il libro avesse la benedizione ufficiale dei censori, Galileo aveva contravvenuto il decreto di 1616. Portò a Galileo davanti all'Inquisizione che lo condannò di tutta la vita a prigione domiciliataria e l'ordinò che rinunciasse pubblicamente al copernicanismo. Per la seconda volta, Galileo si sottomise.
Galileo continuò ad essere un cattolico fedele, ma la sua credenza nell'indipendenza della scienza non era stata distrutta.  Quattro anni prima della sua morte, in 1642,

mentre stava ancora carcerato nella sua casa, il manoscritto del suo secondo libro importante fu passato di contrabbando ad un editore in Olanda. Questo lavoro, conosciuto come *Due nuove scienze,* più perfino che il suo appoggio a Copernico, fu quello che andava a costituire la genesi della fisica

## ISAAC NEWTON

Isaac Newton non era un uomo affabile. Le sue relazioni con altri accademici furono scandalose, passando la maggior parte dei suoi ultimi tempi ingarbugliato in accaldate dispute. Dopo la pubblicazione di li *Comincia Mathematica,* sicuramente il libro più influente mai scritto nel campo della fisica, Newton era asceso rapidamente in importanza pubblica. Fu famoso presidente della Royal Society, e si trasformò nel primo scienziato di tutti i tempi che fu armato cavaliere.

Newton entrò presto in lotta con l'astronomo reale, John Flamsteed, chi prima gli aveva proporzionato molti dei dati necessari per li *Comincia,* ma che ora stava occultando informazione che Newton voleva. Newton non accetterebbe non un per risposta; egli stesso si era nominato per la giunta direttiva dell'Osservatorio Reale, e tentò allora di forzare la pubblicazione immediata dei dati. Finalmente, glieli sistemò affinché il lavoro di Flamsteed cadesse nelle mani dal suo nemico mortale, Edmond Halley, e fosse preparato per la sua pubblicazione. Ma Flamsteed portò il caso ai tribunali e, nell'ultimo momento, ottenne un'ordine giudiziale ostacolando la distribuzione del lavoro rubato. Newton si arrabbiò, e cercò la sua vendetta eliminando sistematicamente tutti i riferimenti a Flamsteed in posteriori edizioni di li *Comincia.*

Mantenne una disputa più seria col filosofo tedesco Gottfried Leibniz. Ambedue, Leibniz e Newton, avevano sviluppato indipendentemente l'uno dall'altro un ramo del matematico chiamato calcolo che sta nella base della maggior parte della fisica moderna. Benché sappiamo ora che Newton scoprì prima il calcolo anni che Leibniz, pubblicò molto dopo il suo lavoro. Sopravvenne un gran scandalo su chi era stato in primo luogo il, con scienziati che difendevano vigorosamente ad ognuno dei contendenti. Bisogna segnalare, nonostante, che la maggioranza degli articoli che apparvero in difesa di Newton stavano scritti originalmente per la sua propria mano, ed editi sotto il nome di amici! Quando lo scandalo crebbe, Leibniz commise l'errore di ricorrere alla Royal Society per risolvere la disputa. Newton, come presidente, nominò un comitato "imparziale" affinché investigasse, casualmente composto nella sua totalità per i suoi amici! Ma quello non fu tutto: Newton scrisse allora egli stesso le relazioni del comitato e fece che la Royal Society li pubblicasse, accusando ufficialmente Leibniz di plagio. Non soddisfatto ancora, scrisse inoltre un'analisi anonima della relazione nella propria rivista della Royal Society. Dopo la morte di Leibniz, si racconta che Newton dichiarò che aveva sentito gran soddisfazione "rompendo il cuore di Leibniz."
Nell'epoca di queste due dispute, Newton aveva abbandonato già Cambridge e la vita universitaria. Aveva partecipato attivamente alla politico anticatólico in detta città, e posteriormente nel Parlamento, e fu ricompensato finalmente col lucroso posto di direttore dell'Accampamento Sposa della Moneta. Lì potè spiegare il suo carattere

furbo e corrosivo di una maniera socialmente più accettabile, dirigendo con successo un'importante campagna contro la falsificazione di moneta che portò perfino vari uomini alla forca.